

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หม้อแปลงเตสลา 400 kV 200 kHz

TESLA TRANSFORMER 400 kV 200 kHz



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 49922

วัน,เดือน,ปี..... 2 เม.ย. 2547

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หม้อแปลงเทสตา 400 kV 200kHz

TESLA TRANSFORMER 400 kV 200 kHz

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1. นายพุทธิรักษ์ มธุรส | รหัสนักศึกษา 43015130 |
| 2. นายขวัญชัย เชิญขวัญ | รหัสนักศึกษา 43015154 |
| 3. นายสมศักดิ์ บุญธรรม | รหัสนักศึกษา 43015184 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. จงรักษ์ บุญเต็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงเตสลา 400 kV 200 kHz

นายพุทธิรักษ์ มธุรส 43015130

นายขวัญชัย เจริญขวัญ 43015154

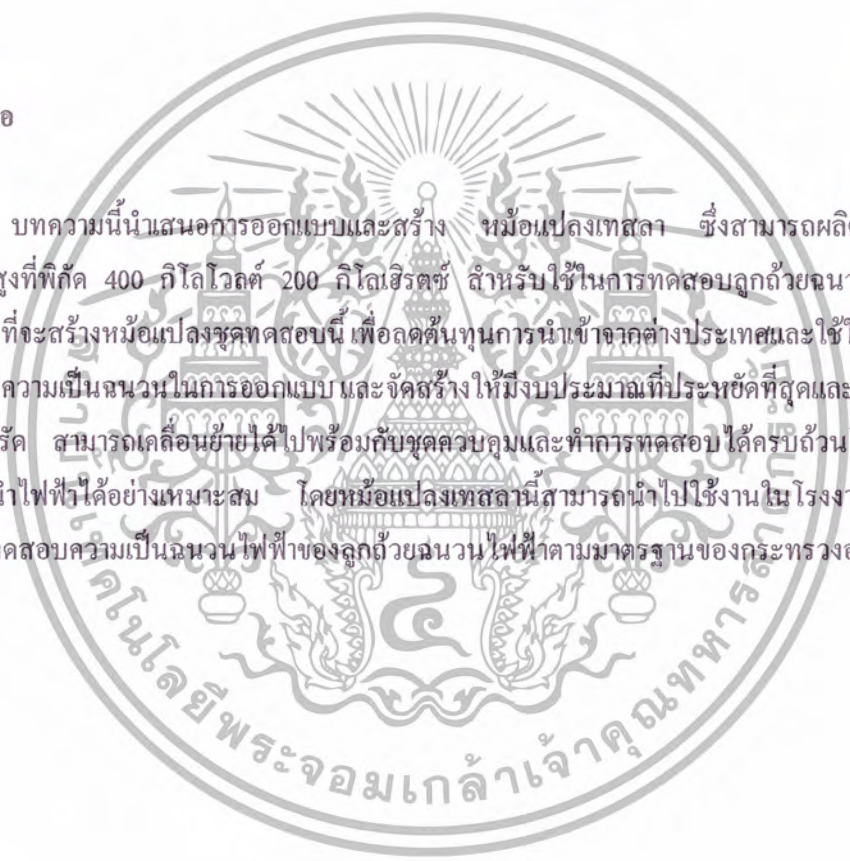
นายสมศักดิ์ บุญธรรม 43015184

รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้าง หม้อแปลงเตสลา ซึ่งสามารถผลิตแรงดันสูงและความถี่สูงที่พิกัด 400 กิโลโวลต์ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ความพยายามที่จะสร้างหม้อแปลงชุดทดสอบนี้ เพื่อลดต้นทุนการนำเข้าจากต่างประเทศและใช้ในการศึกษาการทดสอบความเป็นฉนวนในการออกแบบ และจัดสร้างให้มีงบประมาณที่ประหยัดที่สุดและเป็นชุดทดสอบที่กะทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายได้ไปพร้อมกับชุดควบคุมและทำการทดสอบได้ครบถ้วนโดยควบคุมการเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม โดยหม้อแปลงเตสลาสามารถนำไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อใช้ทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TESLA TRANSFORMER 400 kV 200 kHz

Putthirug Mathuros

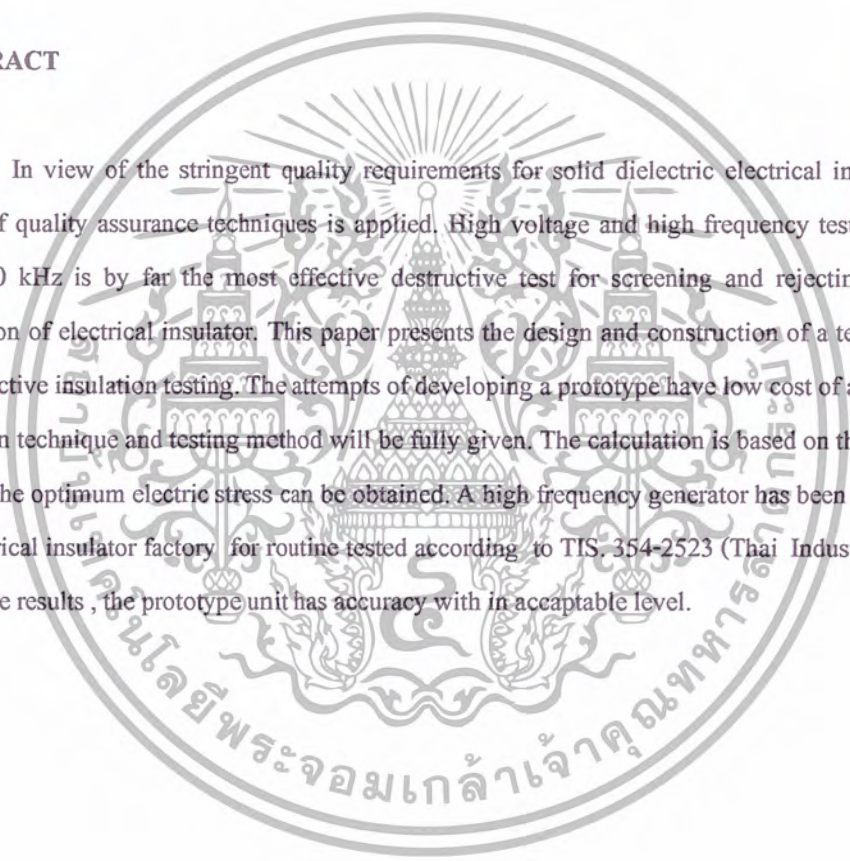
Khwanchai Choengkwan

Somsuk Boontham

Associate.Prof. Jongrug Boonsang Advisor

ABSTRACT

In view of the stringent quality requirements for solid dielectric electrical insulator, a wide range of quality assurance techniques is applied. High voltage and high frequency testing output 400 kV, 200 kHz is by far the most effective destructive test for screening and rejecting poor quality insulation of electrical insulator. This paper presents the design and construction of a tesla transformer for defective insulation testing. The attempts of developing a prototype have low cost of all components. A design technique and testing method will be fully given. The calculation is based on the stress control so that the optimum electric stress can be obtained. A high frequency generator has been tested and used in electrical insulator factory for routine tested according to TIS. 354-2523 (Thai Industrial Standard). Form the results, the prototype unit has accuracy with in acceptable level.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จสิ้นได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน คือ อาจารย์ที่ปรึกษา รุ่นพี่ปริญญาโท รวมทั้งเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ซึ่งต้องขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

และที่ขาดไม่ได้ที่จะต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูงก็คือ คณาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า บิดา มารดา ที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งคอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลเสมอมา ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอขอบคุณมา ณ ที่นี้



พุทธิรักษ์ มรุรส
 ขวัญชัย เชิญขวัญ
 สมศักดิ์ บุญธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
บทที่ 2 พื้นฐานทั่วไป	
2.1 คำนำ	3
2.2 ทฤษฎีทั่วไป	3
2.3 หลักการของหม้อแปลงเตสลา	3
2.4 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสลา	6
2.4.1 กราวด์อ้างอิง (Reference Ground)	6
2.4.2 แกปป้องกัน (Safety Gap)	6
2.4.3 สปาร์กแกป (Spark Gap)	6
2.4.4 ทอรอยด์ (Toroid)	7
2.5 การให้เครื่องหมายที่ขั้วของหม้อแปลง (Polarity Marking)	8
2.6 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor)	10
2.6.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Temperature Effects)	10
2.6.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า (Variation of Electrical Conductor)	11
2.6.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)	11
2.6.4 Skin Effect	11
2.6.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)	12
2.7 ความสำคัญของสนามไดอิเล็กตริก	13
2.8 สถานะการเกิดสปาร์กโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา (Sparkover and Corona Chenonens)	14
2.9 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	1
1.5 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
บทที่ 2 พื้นฐานทั่วไป	
2.1 กลั้วรีนำ	3
2.2 ทฤษฎีทั่วไป	3
2.3 หลักการของหม้อแปลงเตสลา	3
2.4 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสลา	6
2.4.1 กราวด์อ้างอิง (Reference Ground)	6
2.4.2 แกปป้องกัน (Safety Gap)	6
2.4.3 สปาร์กแกป (Spark Gap)	6
2.4.4 ทอรอยด์ (Toroid)	7
2.5 การให้เครื่องหมายที่ขั้วของหม้อแปลง (Polarity Marking)	8
2.6 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor)	10
2.6.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Temperature Effects)	10
2.6.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า (Variation of Electrical Conductor)	11
2.6.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)	11
2.6.4 Skin Effect	11
2.6.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)	12
2.7 ความสำคัญของสนามไดอิเล็กตริก	13
2.8 สภาวะการเกิดสปาร์คโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา (Sparkover and Corona Phenomena)	14
2.9 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อศักดาไฟฟ้าเบรคความ	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

2.10	ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ความถี่สูง (Breakdown Voltage at High Frequency)	16
2.11	ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Insulator or Dielectric Materials)	17
2.11.1	วัสดุฉนวนดีเลิศ (Ideal Insulation Material)	17
2.11.2	ชนิดของวัสดุฉนวน (Type of Insulation Materials)	17
2.11.3	การเบรคดาวน์ของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown)	18
2.11.4	การนำและการดูดกลืน (Conduction and Absorption)	19
2.11.5	ตัวประกอบของกำลัง (Power Factor; $\cos\theta$)	19
2.12	คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulation)	21
2.12.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)	21
2.11.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)	21
2.13	สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน	21
2.13.1	ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า	22
2.13.2	สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)	23
2.12.3	สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)	24
2.12.3	สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)	24
2.14	ลูกถ้วยฉนวน (Insulators)	24
2.14.1	คุณสมบัติของลูกถ้วย (Properties of Insulators)	25
2.14.2	รูปลักษณะสมบัติของลูกถ้วยไฟฟ้าโดยทั่วไป (Charecteristics of Insulators)	25
2.14.3	ชนิดของลูกถ้วยฉนวน (Type of Insulators)	25
2.14.5	ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน	31
2.15	แกปทรงกลม (Sphere Gap)	31
2.15.1	ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศโดยไม่ต่อลงดิน	32
2.15.2	ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศที่ลูกทรงกลมหนึ่งต่อลงดิน	33
2.16	การทดสอบลูกถ้วยฉนวน	33
บทที่ 3	การออกแบบและจัดสร้างหม้อแปลงเตสลา	
3.1	เงื่อนไขการออกแบบ	35
3.2	การเลือกพิกัดหม้อแปลงจ่ายกำลัง	36
3.3	การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1)	36
3.4	การออกแบบขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2)	38
3.5	การออกแบบขดลวดแรงต่ำ (L_1)	43
3.6	การออกแบบสร้างโรครีแกน	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
3.7 วงแหวนป้องกันและแกปป้องกันหม้อแปลงจ่ายกำลัง	45
3.8 ทอรอยด์	46
3.9 ฐานรองรับ	46
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	
4.1 คำนำ	48
4.2 Simulation Model ของหม้อแปลงเทสลา 400 kV 200 kHz	48
4.3 ทดสอบหาค่าคุณลักษณะของหม้อแปลงเทสลา	49
4.3 การทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา	49
4.4 วัดความถี่ของหม้อแปลงเทสลา	53
4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวน	54
4.6 สรุปผลการทดลอง	57
บทที่ 5 สรุปผลของโครงงานและข้อเสนอแนะ	
5.1 คำนำ	58
5.2 สรุปข้อมูลส่วนประกอบโครงสร้างที่ออกแบบไว้	58
5.3 สรุปผลการทดสอบ	59
5.4 ข้อเสนอแนะ	59
5.5 อุปสรรคในการทำโครงงาน	59
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ก. สูตรการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ	60
ข. ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขดลวด	62
ค. วิธีการใช้หม้อแปลงเทสลาทดสอบลูกถ้วย	66
ง. สมการคำนวณขดลวดแรงสูง	69
จ. SPHERE GAP WITH ONE SPHERE EARTH	70
ฉ. Data for Standard Round Copper Wires	76
ช. คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC	77
ซ. เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน	78
ฅ. PARAMETER OF TESLA TRANSFORMER	79
บรรณานุกรม	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่

หน้าที่

2.1 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเตสลา	4
2.2 รูปแบบของทอรอยด์ที่ใช้กับเตสลา	8
2.3 การกำหนดเครื่องหมายที่ขั้วหม้อแปลง	9
2.4 การต่อวงจรทดสอบเพื่อกำหนดตัวอักษรที่ขั้วหม้อแปลง	10
2.5 การไหลของกระแสในลวดตัวนำเนื่องจาก Skin Effect	12
2.6 กราฟความสัมพันธ์เกรเดียนท์สูงสุดกับ r/R	15
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และความถี่	16
2.8 ก.เวกเตอร์ไดอะแกรมของ Pure Capacitor	20
2.8 ข.เวกเตอร์ไดอะแกรมของ Imperfect Capacitor	20
2.9 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าในแบบต่างๆ กัน	22
2.10 การเปรียบเทียบไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	22
2.11 ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ	23
2.12 การกระจายของเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า	24
2.13 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยค้ำตรง	26
2.14 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยแหง	26
2.15 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยค้ำค้ำตรง	26
2.16 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยหลัก	27
2.17 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยแขน	27
2.18 ระยะอาร์คแห้งของลูกถ้วยลนนวน	29
3.1 หม้อแปลงจ่ายกำลังด้านแรงต่ำ	36
3.2 วงจรการต่อตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ	37
3.3 ตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ	38
3.4 บริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลสภาพนำเชิงผิวของลวดทองแดง	41
3.5 มิติในการพันขดลวดแรงสูงที่ใช้ในสมการที่ 3.14 และ 3.15	41
3.6 ขดลวดแรงดันสูง L_2	42
3.7 มิติการพันขดลวดแรงต่ำจากสมการที่ 3.17	43
3.8 ขดลวดแรงต่ำ	43
3.9 โรตารีสปาร์คแกป	45
3.10 แกปป้องกันหม้อแปลงจ่ายกำลัง	46
3.11 ลักษณะของทอรอยด์	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.12 ลักษณะของฐานรองรับ	47
4.1 Simulation Model ของวงจรสมมูลย์หม้อแปลงเตสลา	48
4.2 ผลการ Simulation ของหม้อแปลงเตสลา	48
4.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงเตสลา	49
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกกับจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ	52
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกกับระยะสปาร์คแกป	52
4.6 คลื่นสัญญาณความถี่ขาออกด้านแรงสูง	53
4.7 การใช้หม้อแปลงเตสลาทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน ชนิด AIL 57-2	54
4.8 การวางไฟตามผิวลูกถ้วยก้านตรงชนิด 56-3 ที่มีสภาพดี	55
4.9 การทดสอบลูกถ้วยก้านตรง 56-2 ที่บกพร่อง	55
4.10 การทดสอบการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยก้านตรง 56-2	56
4.11 การทดสอบการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยแท่ง AIL 57-2	56
ก.1 ลักษณะการพันขดลวด Archimedes Spiral	60
ก.2 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Helical Coil	60
ก.3 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Inverse Coil	61
ข.1 ลักษณะการวางตัวของตัวนำที่หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า	62
ข.2 ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ	63
ข.3 ลักษณะการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกแกนร่วม	64
ง ลักษณะการพันของขดลวดทางด้านแรงสูง	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลงน็ออน	7
2.2 เปรียบเทียบเครื่องหมายปลายสายที่ขั้วของหม้อแปลง	9
2.3 ระยะเวลาที่แห้งระยะส่วนที่เป็นอากาศและระยะส่วนที่ผิวฉนวนลูกถ้วย	28
3.1 ขนาดของท่อและความสูงที่เหมาะสมในการพันขดลวดแรงสูง	38
4.1 แรงดันขาออกด้านแรงสูงเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบแรงต่ำ (ที่ระยะแกป 0.375 mm)	50
4.2 แรงดันขาออกทางด้านแรงสูงที่ระยะแกปต่างๆ	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมา

ในอดีตประเทศไทยต้องสั่งซื้อลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจากต่างประเทศ เข้ามาใช้ด้วยราคาที่แพง เมื่อความต้องการใช้ไฟฟ้าของประชาชนเพิ่มมากขึ้นก็จำเป็นต้องใช้ลูกถ้วยจำนวนมากเช่นกัน จึงได้มีการศึกษาวิจัยเนื้อเซรามิกเพื่อทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนขึ้นเป็นอุตสาหกรรมเป็นผลให้ปัจจุบันมีโรงงานผลิตลูกถ้วยแรงสูงแบบพอร์ซเลนหลายแห่ง โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบภายในประเทศ ในทางอุตสาหกรรมการผลิตลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนจะใช้หม้อแปลงเตสตาเป็นตัวจ่ายแรงดันสำหรับทดสอบลูกถ้วยที่ผลิตขึ้นในโรงงาน เพื่อทดสอบคุณภาพขั้นต้นของลูกถ้วยว่ามีความบกพร่องภายในเนื้อฉนวนลูกถ้วยหรือไม่ ด้วยวิธีการทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดยใช้แรงดันสูงและความถี่สูงในการตรวจสอบความบกพร่องภายในลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน หากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนมีรอยแตกร้าว รูพรุน หรือมีความบกพร่องภายในจะไม่เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน แต่จะเกิดการเจาะทะลุซึ่งเป็นผลเนื่องจากความร้อนสูงและความถี่สูง ฉะนั้น โรงงานผลิตลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนทุกแห่งจะต้องมีหม้อแปลงเตสตาสำหรับใช้ทดสอบลูกถ้วยที่ผลิตขึ้น แต่หม้อแปลงเตสตาที่สั่งซื้อจากต่างประเทศนั้นมีราคาแพงมาก จึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในด้านนี้ในสถาบันการศึกษาต่างๆ เพื่อประกอบสร้างหม้อแปลงเตสตาขึ้นเองโดยใช้วัสดุภายในประเทศ ซึ่งจะสามารถช่วยให้สร้างหม้อแปลงเตสตาขึ้นในราคาที่ประหยัดและมีขีดความสามารถในการใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้จริงและมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการสร้างหม้อแปลงเตสตาที่พิกัด 400 kV 200 kHz เพื่อทดสอบและวัดผลการทำงานของหม้อแปลงเตสตา เพื่อใช้เป็นตัวจ่ายแรงดันทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน และเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องทดสอบลูกถ้วยฉนวนต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสตา 400 kV 200 kHz ที่สามารถใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนในระบบแรงดัน 11, 24, 33 kV ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ใช้เป็นชุดศึกษาและทดลองการเกิดฟ้าผ่า
- 2) ใช้เป็นชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนเพื่อใช้ประกอบการสอน
- 3) ใช้เป็นชุดทดสอบผลทางด้าน Corona
- 4) ใช้ศึกษาผลทางด้าน Electromagnetic Wave จาก Corona

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการทำโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีรายละเอียดเงื่อนไขต่างๆ และ โครงสร้างของหม้อแปลงเตสลาที่พิกัด 400 kV 200 kHz
- 2) ทำการออกแบบส่วนประกอบและ โครงสร้างส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงเตสลาที่พิกัด 400 kV 200 kHz
- 3) ทำการสร้างส่วนประกอบ โครงสร้างส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงเตสลาที่พิกัด 400 kV 200 kHz ที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว
- 4) ทำการทดสอบหาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงเตสลา และทำการแก้ไขในส่วนที่บกพร่องบางประการ
- 5) ทำการสรุปผลการทำโครงการนี้ ข้อเสนอแนะและปัญหาในการทำโครงการ การเขียน การพิมพ์ ตรวจสอบแก้ไขและการนำเสนอรายงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 พื้นฐานทั่วไป

2.1 กล่าวนำ

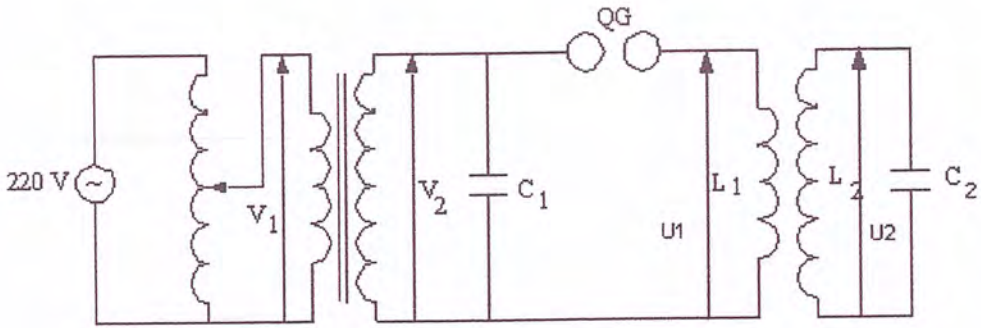
ก่อนที่จะทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลา เราจะต้องทราบถึงทฤษฎีและหลักการทำงาน รวมไปถึงองค์ประกอบพื้นฐานเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงเตสลา เช่น คุณสมบัติของตัวนำ สมบัติของวัสดุฉนวน สภาพการเหนี่ยวนำ ลักษณะการเกิดการคับปลิงระหว่างขดลวดทั้งสอง เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาทำการออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาซึ่งจะกล่าวในบทที่ 2 นี้

2.2 ทฤษฎีทั่วไป

หม้อแปลงเตสลาจัดได้ว่าเป็นประเภทหม้อแปลงที่เป็นชนิดพิเศษ โดยที่ใช้แกนของหม้อแปลงเป็นแกนอากาศ ขดลวดทั้งสอง คือ ขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกัน การสร้างศักดาไฟฟ้าแรงสูงและความถี่สูงของหม้อแปลงจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรอบของหม้อแปลงเตสลา (Turn Ratio) แต่จะอาศัยหลักการเกิดออสซิลเลท (Oscillate) ในวงจร LC เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และ C คือ ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของวงจรหม้อแปลงเตสลา (Tesla Transformer) โดยขดลวดทั้งสองจะคับปลิง (Coupling) กันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านอากาศ (Air Core) ฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) จะต่ำมาก ขดลวดด้านทุติยภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานจากขดปฐมภูมิที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมากมายที่ความถี่เรโซแนนซ์จะอยู่ระหว่าง 50 Hz ถึง 500 Hz แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกจะมีค่าเริ่มตั้งแต่ 100 kV ขึ้นไป ถ้าหากพลังงานที่ป้อนให้มีค่าเพียงพอแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงช่วงเมกะโวลต์ (Mega Volt) และถ้าเกินมีแรงดันเพิ่มสูงขึ้นไปถึงช่วงระดับแรงดันที่แน่นอนจะทำให้เริ่มเกิดการสปาร์ก (spark) และจะเปลี่ยนเป็นลำฟ้าผ่า (Lighting) ซึ่งจะนำไปใช้ทดสอบความบกพร่องภายในเนื้อฉนวนลูกถ้วย (Insulators) ถ้าลูกถ้วยดีก็จะเกิดการจ๊วบไฟคามพิว (Flash Over) เหตุที่ต้องใช้ความถี่สูงนั้นเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นการเกิดควาไปได้ชัดเจนขึ้น

2.3 หลักการของหม้อแปลงเตสลา

จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเตสลา และส่วนประกอบอื่นๆของวงจร ได้แก่ C_1 เป็นตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ ส่วน C_2 เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งเป็นค่าความจุแฝง (Stray Capacitance) และมีแกปดับอาร์ค (Quenching Gap) เป็นตัววัดระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปิดปิดแกปดับอาร์ค และยังทำหน้าที่ตัดอาร์คหรือสปาร์คอีกด้วย



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลา

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ประมาณ 15 kV ให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และเมื่อ C_1 ถูกอัดประจุจนได้รับแรงดันไฟฟ้าถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวนจะทำให้เกิดการเบรคดาว์ระหว่างช่องอากาศที่ตัวแก๊ปดับอาร์ค (Quenching Gap) ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาครบวงจร เป็นผลให้ C_1 ทำการคายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ L_1 และ L_2 ก็จะเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเก็บพลังงานเต็มที่แล้ว L_1 ก็จะถ่ายเทพลังงาน (Transfer Energy) ที่เก็บไว้กลับไปให้ C_1 ใหม่ ลักษณะของการถ่ายเทพลังงานกลับไปกลับมาจะระหว่าง L_1 กับ C_1 ทำให้เกิดการออสซิลเลท (Oscillate) ต่อเนื่องแบบ Damped oscillation ที่ความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 1/50 วินาที ใน 1 Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ C_1 ใน 1 Cycle จะทำให้เกิดการอัดประจุและการคายประจุในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบ Damped Oscillation อย่างต่อเนื่อง 100 ครั้ง ใน 1 วินาที ความถี่ออสซิลเลทที่ใช้จะสูงประมาณ 100-250 kHz ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของตัวออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทนั้นสามารถหาได้จากสมการ

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.1)$$

- เมื่อ L_1 = เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น H
 C_1 = ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น F
 f_1 = ความถี่ออสซิลเลท มีหน่วยเป็น Hz

การเกิดออสซิลเลท (Oscillation) ในวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงเตสลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกับทางด้านปฐมภูมิ ดังนั้นวงจรทางด้านปฐมภูมิจะส่งพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ คือ L_2 กับ C_2 ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าเพื่อค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ L_2 และ Stay Capacitance (C_2) มีค่าเท่ากับวงจรทางด้านปฐมภูมิ คือ $L_1C_1 = L_2C_2$ จะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบหน่วง (Damped Oscillation) อย่างต่อเนื่อง และพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$W = \frac{1CV^2}{2} \quad (2.2)$$

โดยที่ W = พลังงานที่เกิดขึ้น

C = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวเก็บประจุ

และสามารถพิจารณาหาค่าแรงดันทางด้านขาออกของวงจรสร้างแรงดันสูงและความถี่สูงได้ตามสมการที่จะแสดงดังนี้

$$U_2 = \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} * U_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออก

U_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า

η คือ ประสิทธิภาพการถ่ายทอดพลังงานของวงจร

$$U_{2max} = \rho \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} * U_1 \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันซึ่งมีค่าเป็น

$$\rho = \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a)^2 - 4\sigma a}}$$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนการจูนซึ่งมีค่าเป็น

$$a = \frac{L_2C_2}{L_1C_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า a มีค่าสูงสุดเมื่อ $a = 1 - 2K^2$

และค่า K คือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงซึ่งมีค่าเป็น

$$K = \sqrt{1 - \sigma}$$

โดยที่

$$\sigma = 1 - M^2 / (L_1 L_2) = 1 - K^2$$

เมื่อ M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทั้งสอง

เมื่อแรงดันจ่ายออกทางด้านแรงสูงมีค่ามากพอจะทำให้การเบรคดาวน์ หรือมีการรวบไฟตามผิววัสดุตามต้องการ เช่น ลูกถ้วยฉนวน ซึ่งการเกิดการรวบไฟนี้จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสปาร์คอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะการเกิดรวบไฟตามผิวจะบ่งบอกถึงความสมบูรณ์หรือบกพร่องของลูกถ้วยที่ทำการทดสอบได้

2.4 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสตา

2.4.1 กราวด์อ้างอิง (Reference Ground)

กราวด์อ้างอิงถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อต้องการจะทำให้เกิดการทํางานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีกราวด์ที่ดี ในส่วนที่อยู่ล่างสุดของทางด้านทุติยภูมิจะมีกระแสไหลอย่างมากหลายแอมป์ (Ampere) โดยจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงาน (Power) ของหม้อแปลง กราวด์ที่จะนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่ต่ำมากๆ ถึงจะเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานเกี่ยวกับหม้อแปลง

2.4.2 แกปป้องกัน (Safety Gap)

ในขณะการทำงานของหม้อแปลงที่แรงดันสูงทางด้านทุติยภูมิ บางครั้งอาจจะมีแรงดันที่สูงมากไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายได้ ความผิดพลาดของแรงดันสูงๆที่เกิดขึ้นบ่อยๆจะเรียกว่า คิกแบค (Kickback) แกปป้องกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น และทำการออกแบบขึ้นมาเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับแหล่งจ่าย (Power Supply) ได้เนื่องจาก Kickback ปกติจะติดตั้งกับหม้อแปลงนีออนที่อยู่ทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายของหม้อแปลงเตสตา แกปป้องกันจะมีความแตกต่างกับแกปหลัก เพราะแกปป้องกันจะความร้อนขึ้นบางครั้งบางคราวเท่านั้นการปรับแต่งของแกปป้องกัน โดยปกติจะปรับแต่งให้เพียงพอกับการป้องกันแหล่งจ่ายเท่านั้น การปรับตั้งระยะของแกปป้องกันสำหรับหม้อแปลงนีออนที่มีขนาดตั้งแต่ 9 , 12 หรือ 15 kV ปกติจะใช้ระยะแกป คือ 3/8 นิ้วก็พอ ถ้าปรับแล้วไม่เกิดการสปาร์ค (Spark) เลย หรือเกิดขึ้นน้อยครั้ง ก็ให้ทำการปรับระยะแกปเข้ามาอีกเพียงเล็กน้อย

2.4.3 สปาร์คแกป (Spark Gap)

สปาร์คแกปจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ความเร็วสูง ตัวสปาร์คแกปจะต้องครอบคลุมระดับแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) หรือสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Semiconductor) การออกแบบต้องสามารถเป็นสวิตช์ (Switch) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงๆอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่า สปราร์คแกป เมื่อแรงดันตกคร่อมสปราร์คแกปมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างตัวของแกปเริ่มเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) หากว่าเกิดการไอออไนซ์ที่เพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เป็นสื่อที่แกปกระโดดไปยังอีกแกปหนึ่งได้ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมแกปมีค่าลดลงจะทำให้การไอออไนซ์ลดลงด้วย และแกปก็จะกลับสภาพเดิม คือ เป็ดวงจร (Open Circuit) การดับของอาร์คจะเป็นไปตามเวลาที่กำหนดให้ดับ แกปจะต้องมีความแข็งแรงที่จะทำการหยุดเป็นตัวนำที่รวดเร็วได้โดยจำนวนของแกปที่ต่ออนุกรมอยู่ ความร้อนและไอออน (Ion) จะเกิดขึ้นและแผ่ขยายไปเต็มพื้นที่ ถ้ามีอากาศเป่าที่แกปจะทำให้การดับอาร์คทำได้ดียิ่งขึ้น โดยอาศัยอากาศเป็นตัวช่วยทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนร้อน (Hot Ion) ที่เป็นสื่อในแกปเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น การต่อแบบอนุกรมของแกปเรียกว่า สเตติกแกป (Static Gap) และยังมีอีกชนิดหนึ่งคือ โรตารีแกป (Rotary Gap) จะมีส่วนประกอบคือหนึ่งคู่ตัวนำที่อยู่กับที่ และหลายคู่ตัวนำที่เคลื่อนที่ด้วยการหมุน โดยที่มีข้อแม้ว่าระหว่างแกปหนึ่งคู่ตัวนำที่หมุนจะต้องตรงกัน หรือเป็นแนวเดียวกันกับตัวนำที่หยุดนิ่งจะทำการดับอาร์คโดยการทำงานของตัวนำที่เคลื่อนที่ สำหรับแกปของสเตติกแกปที่นำมาต่ออนุกรมกันที่ใช้หม้อแปลงน็อนเป็นแหล่งจ่ายนั้น จะมีจำนวนและขนาดตัวนำขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงน็อนสามารถดูได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลงน็อน

แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง	จำนวนของตัวนำ	จำนวนของสปราร์คแกป
9 kV	7	6
12 kV	9	8
15 kV	11	10

ตัวนำที่ใช้ทำแกปจะหามาจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $3/4$ นิ้ว และมีขนาดความยาว 3 ถึง 4 นิ้ว ระยะระหว่างแกปตัวนำจะอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.03 นิ้ว แกปจะสามารถใช้ได้กับขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1.5 kW ขึ้นไป

2.4.4 ทอรอยด์ (Toroid)

ทอรอยด์ของหม้อแปลงเตสลา มีหน้าที่ต่างๆดังนี้

1) ทอรอยด์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของขดลวดขุมขุมของหม้อแปลงเตสลา เป็นส่วนช่วยทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ถ้าทอรอยด์มีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ได้ค่าของตัวเก็บประจุที่มากด้วย เมื่อขดลวดทำงานก็จะทำให้เกิดหมอกอากาศของการไอออไนซ์ขึ้นรอบๆ จุดต่อของทอรอยด์ แต่ถ้าทำการต่อของทอรอยด์ที่จุดต่อจะทำให้การเกิดไอออไนซ์มีความราบเรียบและสมบูรณ์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทอรรอยด์จะทำให้มีเสถียรภาพขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดของขดทุกขดของหม้อแปลงเตสลา คือพยายามทำให้แรงดันลาดเอียง (Voltage Gradient) ลดลงอย่างมาก ในส่วนของระดับแรงดันที่เกิดขึ้นบนจุดต่อของทอรรอยด์จะกลายเป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก

3) ทอรรอยด์ทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดของขดลวดทางด้านทุกขดของหม้อแปลงเตสลา

จากที่กล่าวมาแล้วทอรรอยด์จะมีสนามไฟฟ้ารอบๆ ส่วนบนของขดทุกขดขดที่มีค่ามากที่สุด จึงเป็นเหตุผลทำให้เราเลือกใช้ทอรรอยด์ในหม้อแปลงเตสลา และที่ต่อทอรรอยด์จะมีค่าของตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จาก

$$C = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{\pi d_2 (d_1 - d_2)} \quad (2.5)$$

C = ค่าความจุไฟฟ้า, pF

d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, นิ้ว

d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอรรอยด์, นิ้ว



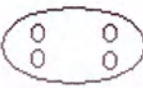

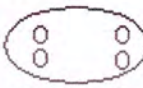
รูปที่ 2.2 รูปแบบของทอรรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงเตสลา

2.5 การให้เครื่องหมายที่ขั้วของหม้อแปลง (Polarity Marking)

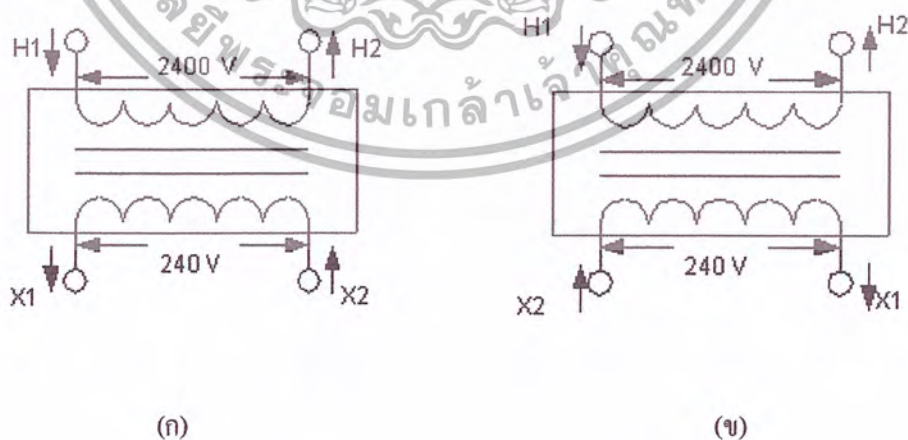
การกำหนดขนาดเครื่องหมายปลายสายที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิเป็นสิ่งที่สำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ บริษัทหรือโรงงานผู้ผลิตจึงได้ทำเครื่องหมายที่ขั้วไว้ซึ่งขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตนั้นยึดถือ ตารางที่ 2.2 แสดงเครื่องหมายที่ขั้วสาย การจัดวางและขั้วของหม้อแปลงแต่ละมาตรฐาน JEC คือ มาตรฐานของญี่ปุ่น ANSI คือ มาตรฐานของอเมริกา และ BS คือ มาตรฐานของอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเครื่องหมายปลายสายที่ขั้วของหม้อแปลง

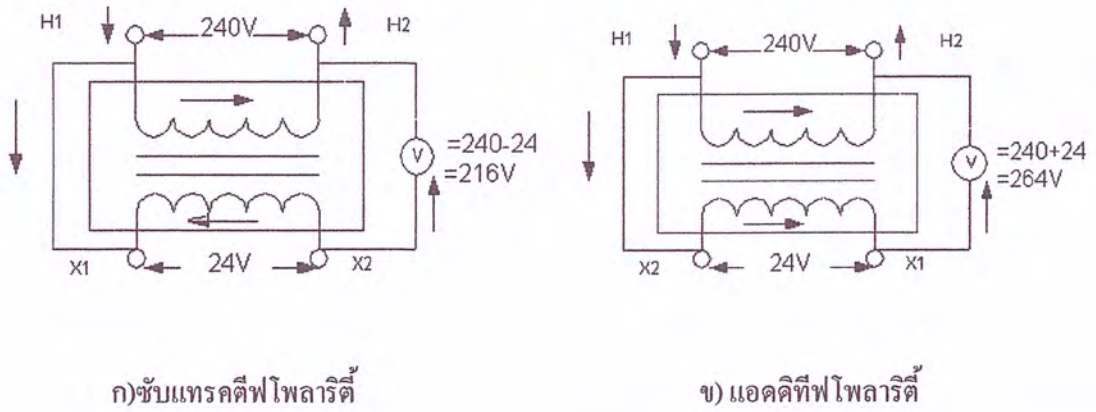
รายการ		มาตรฐาน		JEC-168		ANSI-C57-12		BS-171	
เครื่องหมาย ปลายสาย	ขดลวดแรงดันสูง	U	V	H1	H2	A1	A2		
	ขดลวดแรงดันต่ำ	u	v	X1	X2	a1	a2		
	ขดลวดชุดที่สาม	a	b	Y1	Y2	3A1	3A3		
การให้เครื่องหมายที่ขั้วบนถึงหม้อแปลง		U	V	H1	H2	A1	A2		
									
		u	v	x1	x2	a1	a2		

การกำหนดตัวอักษรที่ใช้เป็นเครื่องหมายปลายสายประจำขั้วของหม้อแปลง โดยใช้มาตรฐาน A.S.A. (American Standard Association) ซึ่งเป็นสมาคมผู้กำหนดมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา เป็นผู้คิด และกำหนดมาตรฐานขึ้น โดยกำหนดให้ขั้วของขดลวดแรงดันสูงเป็น H_1 และ H_2 ที่ขั้วของขดลวดแรงดันต่ำ เป็น X_1 และ X_2 ถ้าวางหม้อแปลงโดยให้ขดลวดแรงดันสูงอยู่ห่างจากตัวเรา (หรือเรายืนหันหน้าเข้าหา หม้อแปลงทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ) ให้กำหนดขั้วด้านซ้ายมือของขดลวดแรงดันสูงเป็น H_1 และขั้วด้าน ขวามือเป็น H_2 เสมอ ถ้าจะกำหนดเครื่องหมายที่ขั้วหม้อแปลงเป็นแบบ ขั้วแทรกคิต์ฟ โพลาริตี ขั้วของ ขดลวดแรงดันต่ำด้านซ้ายมือจะต้องเป็น X_1 และด้านขวามือจะเป็น X_2 ดังรูปที่ 2.3 (ก) และถ้ากำหนด เครื่องหมายที่ขั้วหม้อแปลงเป็นแอคคิต์ฟ โพลาริตี ขั้วของขดลวดแรงดันต่ำด้านซ้ายมือจะต้องเป็น X_2 และขั้วด้านขวามือจะต้องเป็น X_1 ดังรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.3 การกำหนดเครื่องหมายที่ขั้วหม้อแปลง ก)ขั้วแทรกคิต์ฟ โพลาริตี ข) แอคคิต์ฟ โพลาริตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การต่อวงจรทดสอบเพื่อกำหนดตัวอักษรที่ขั้วหม้อแปลง

การทดสอบเพื่อกำหนดตัวอักษรที่ขั้วของหม้อแปลง สามารถกระทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 2.4 (ก) แล้วป้อนแรงดัน 240 โวลต์ เข้าขดลวดด้านแรงดันสูง การกำหนดขั้วสายของหม้อแปลงจะต้องเป็น ขั้วแทรกคิตีฟ โพลาริตี ถ้าโวลท์มิเตอร์อ่านค่าได้เท่ากับผลต่างของแรงดันทั้งสองด้าน หรืออ่านค่าได้น้อยกว่าแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันสูง การกำหนดขั้วสายของหม้อแปลงจะต้องเป็น แอดคิตีฟ โพลาริตี ถ้าค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์สูงกว่าแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันสูง หรือมีค่าเท่ากับผลบวกของแรงดันทั้งสองด้าน

2.6 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor)

คุณลักษณะต่างๆของวัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงเตสลา จะมีข้อกำหนดหลายอย่างที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นพื้นฐาน หรือเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุนั้นๆ เช่น คุณสมบัติของฉนวนนี้เป็นตัวประกอบที่สำคัญที่สุด ในการออกแบบและการตัดสินใจเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุต่างๆอย่างเหมาะสม จะเป็นผลทำให้การออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.6.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Temperature Effects)

โดยส่วนมากวัสดุที่เป็นโลหะนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทาน มักจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงในสมการ

$$R_t = R_{20} + \alpha_{20}(T - 20) \quad (2.6)$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานที่ 20 องศาเซลเซียส

T = อุณหภูมิห้องที่ใช้งาน

α = ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบขดลวด คือ การเลือกขนาดที่ถูกต้องของขดลวดซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิของขดลวดที่สูงขึ้นภายใต้สภาวะที่มีกระแสไหลอยู่ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นด้วย

2.6.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า (Variation of Electrical Conductor)

ไม่มีวัสดุตัวนำทางไฟฟ้าใดที่จะเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิทั่วไป อย่างน้อยย่อมจะมีค่าความต้านทานอยู่บ้าง ค่าความต้านทานชนิดเอกพันธ์ (Homogenous Material) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวขนาดของพื้นที่หน้าตัดและค่าความต้านทานจำเพาะสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.7)$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานจำเพาะ ($\Omega \cdot m$)
 l = ความยาวของตัวนำ (m)
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

2.6.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)

ค่าความต้านทานของวัสดุตัวนำจะเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากค่าความถี่ของกระแสที่ไหลในตัวนำ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้คือ ลวดเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นแบบวงกลม ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในตัวนำเส้นลวดตรงกลางจะมีค่ามากกว่าบริเวณผิว เนื่องจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ในส่วนตรงกลางมีค่ามากกว่า จึงทำให้กระแสส่วนมากจะไหลบริเวณผิวของตัวนำ ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่นำกระแสนั้นเล็กกว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำจริง

2.6.4 Skin Effect

ในการใช้งานของลวดตัวนำที่แรงดันกระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ กระแสไฟฟ้าจะไหลในตัวนำได้เต็มพื้นที่หน้าตัด แต่เมื่อใช้งานที่กระแสสลับความถี่สูงจะไม่เป็นเช่นนั้น คือ จะเกิด Skin Effect เป็นปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำ เมื่อมีกระแสไหลก็จะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางถึงส่วนนอกสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย เมื่อมีความถี่สูงสนามไฟฟ้าจะทำการชาร์จอย่างรวดเร็วจะทำให้สนามแม่เหล็กชาร์จด้วย และเกิดเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำหรือสนามแม่เหล็กชาร์จอย่างรวดเร็วด้วยตัวมันเอง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในลวด เป็นผลทำให้เกิดกระแสที่สูงมากที่ด้านนอกของเส้นผ่านศูนย์กลาง และจะทำให้กระแสที่จุดกึ่งกลางจะลดลงมาก ซึ่งส่วนใหญ่ที่ความถี่สูงกระแสจะไหลในลวดเพียงบริเวณรอบๆผิวของสายตัวนำเท่านั้น ซึ่งด้านในสายทั้งหมดจะไม่มีกระแสไหลเลย เป็นผลมาจากความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทำเป็นลวดตัวนำ ตามรูปที่ 2.5 เป็นการอธิบายผลที่เกิดจาก Skin Effect ที่ถูกสรุป(ชี้ขึ้น)แสดงถึงกระแสหลักที่ไหลในลวดตัวนำกระแสจะเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคู่ได้จากวงรี สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสด้วยตัวเองโดยการชาร์จ ส่วนของกระแสสามารถดูได้ที่วงกลม โดยทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งที่จุดศูนย์กลางกระแสจะลดลงและที่ผิวของลวดตัวนำจะมีกระแสเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวของสารตัวนำสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.8)$$

- เมื่อ δ = ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวลวดตัวนำ
 f = ความถี่ของกระแส, Hz
 μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทำลวดตัวนำ
 σ = สภาพนำไฟฟ้าของลวดตัวนำ



รูปที่ 2.5 การไหลของกระแสในลวดตัวนำเนื่องจาก Skin Effect

ในการแก้ปัญหาที่เกิดจาก Skin Effect คือ เราจะใช้ลวดตัวนำที่ขนาดเล็กมักรวมกันเป็นขนาดใหญ่ หรือจากการออกแบบจะใช้เป็นลวดตัวนำแบบบกลวง

2.6.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)

ปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บนลวดตัวนำใกล้จะเกิดเป็นแรงดันเบรคดาวน์และปรากฏการณ์โคโรนาจะขึ้นอยู่กับลวดตัวนำนั้นๆ โดยทั่วไปที่ลวดตัวนำที่มีรัศมีเล็กมากๆ จะเป็นเรื่องง่ายสำหรับการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) ปรากฏการณ์โคโรนาสามารถมองเห็นเป็นแสงสว่างสีฟ้าขึ้นรอบๆ ลวดตัวนำ การเกิดปรากฏการณ์โคโรนานี้จะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้า เราสามารถลดปรากฏการณ์โคโรนาได้โดยการนำส่วนที่มีความสม่ำเสมอไปแทนที่จุดที่มีความแหลม เพื่อให้มีความเครียดของสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอหรือมีความเข้มของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเป็นการทำให้การเกิดปรากฏการณ์โคโรน่านั้นลดลง ผลของการเกิด Corona Discharge จะเป็นเหตุให้ผิวของลวดตัวนำหรือฉนวนเสื่อมคุณภาพ และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปโดยเปล่าประโยชน์

2.7 ความสำคัญของสนามไดอิเล็กตริก

แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (NI) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) ทำให้เกิดสนามไดอิเล็กตริกขึ้น ถ้าในวงจรสนามแม่เหล็กมีฟลักซ์ที่มีค่าเท่ากันไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ไม่เท่ากัน เพื่งารณาที่ความยาวของวงจรสนามแม่เหล็กที่เท่ากัน บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กหนาแน่นมากแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวก็มีค่ามาก แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กเรียกว่า Magnetizing Force ทำนองเดียวกัน สำหรับสนามไดอิเล็กตริกบริเวณใดที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงไดอิเล็กตริกสูง ก็จะมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของวงจรไดอิเล็กตริกเรียกว่าเกรเดียนท์ (Gradient) ในวงจรแม่เหล็กที่มีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กคงที่ วัสดุใดมีความซึมซาบสูงวางไว้ในสนามแม่เหล็กจะฟลักซ์แม่เหล็กมาก ในทำนองเดียวกัน ในวงจรไดอิเล็กตริกวัสดุใดที่มีค่าความซึมซาบสูงวางในสนามไดอิเล็กตริก จะเกิดฟลักซ์ไดอิเล็กตริกมาก ฉนวนจะเกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่จุดใดๆ ก็ต่อเมื่อความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กตริกที่จุดนั้นจะมีค่าสูง ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กตริกวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินค่าวิกฤตนี้ จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นตัวนำ นั่นคือ เบรคดาวน์ (Breakdown) ดังนั้นในเรื่องของวิชาไฟฟ้าแรงสูง การพิจารณาเกี่ยวกับการเบรคดาวน์ของฉนวนจึงมีความสำคัญมาก ฟลักซ์ไดอิเล็กตริก (ψ) ในฉนวนขึ้นอยู่กับศักดาไฟฟ้า ความซึมซาบ (Permittivity) ของฉนวน ระยะห่าง และรูปร่างของอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการของฟลักซ์ได้ดังนี้

$$\psi = CV \quad (2.9)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ที่จุดใดๆ ขึ้นอยู่กับเกรเดียนท์ (Gradient) E , Volt/cm และขึ้นอยู่กับความซึมซาบ (Permittivity) ของฉนวนด้วย

$$\begin{aligned} D &= \left(\frac{dv}{dx} \right) \epsilon_0 \epsilon_r \\ &= E \epsilon_0 \epsilon_r \\ &= \psi / A \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดย ϵ_0 = ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

ϵ_r = Relative Permittivity ของไดอิเล็กตริก

A = พื้นที่หน้าตัดของฉนวนไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ความหนาแน่นฟลักซ์ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ (Gradient = dv/dx) ดังนั้นฉนวนจะเบรคความถี่เมื่อ Gradient มีค่ามากเกินไป ความแข็งแรงของฉนวนอาจบอกมาในเทอมของ Gradient แทนที่จะเป็นความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กตริก (Dielectric Flux Density)

2) ความเค้น (Stress) ที่บนฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับศักดาไฟฟ้าอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเล็กโตรดด้วยเช่นกัน กรณีรูปร่างของอิเล็กโตรดแหลมเหมือนเข็มความหนาแน่นฟลักซ์หรือเกรเดียนท์ที่ปลายมีค่าสูงมาก แม้ว่าศักดาไฟฟ้ามีค่าน้อย จากที่ได้ศึกษาพอสรุปได้ว่าจุดใดมีความหนาแน่นฟลักซ์มากในวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดความสูญเสียมาก แต่วงจรไดอิเล็กตริกความหนาแน่นฟลักซ์ทำให้ฉนวนเสียหายได้

3) ค่าเกรเดียนท์ที่ผิวตัวนำนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง และลักษณะการวางตัวนำมีความสัมพันธ์กันซึ่งสามารถแยกตามลักษณะทางเรขาคณิต เช่น ทรงกลม แผ่นระนาบขนานกัน ทรงกระบอกแกนร่วม และลวดตัวนำขนานกัน

2.8 สภาวะการเกิดสปาร์กโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา (Sparkover and Corona Chenonens)

สำหรับลวดตัวนำในทรงกระบอกเกรเดียนท์สูงสุด ซึ่งการเบรคความถี่จะเกิดขึ้นที่จุดใดก่อนนั้นก็คือ ที่ผิวของลวดตัวนำซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

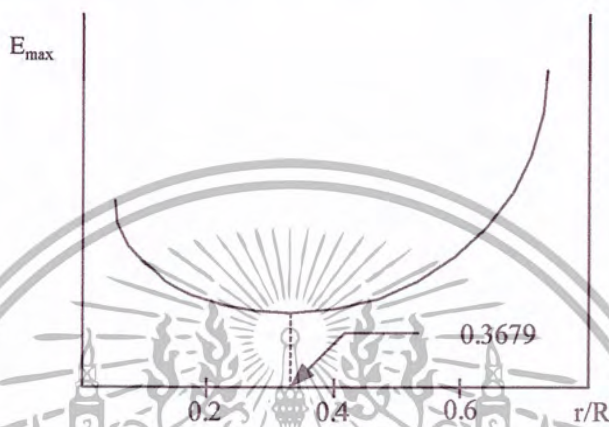
$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{kV/cm} \quad (2.11)$$

โดยที่ V คือ ศักดาไฟฟ้าระหว่างลวดตัวนำและทรงกระบอกที่ทำให้เกรเดียนท์ของผิวตัวนำเปลี่ยนสภาพจากที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำ ทำให้เกิด โคโรนา (อากาศนั้นมีค่าเบรคความถี่ที่ 30 kV/cm ที่ความดัน 760 mm.Hg ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้มีผลทำให้เสมือนลวดตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าหากการที่ลวดตัวนำเสมือนมีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ทำให้เกรเดียนท์ที่ถัดออกไปจากบริเวณที่เกิดโคโรนาค่าลดลง การเบรคความถี่จะไม่ถูกลดต่อไป คือ ไม่เกิดการเบรคความถี่แบบต่อเนื่องที่เรียกว่าเกิดโคโรนาที่ผิวของลวดตัวนำ แต่ถ้การเบรคความถี่ของอากาศที่ผิวลวดตัวนำทำให้อากาศเป็นตัวนำและลวดตัวนำเสมือนมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว เกรเดียนท์ที่ถัดออกไปจากบริเวณที่อากาศเป็นตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเบรคความถี่ถูกลดต่อเนื่องออกไปและในที่สุดก็จะเกิดสปาร์กโอเวอร์ ดังนั้นสภาวะการเกิดโคโรนาหรือสปาร์กโอเวอร์ (Spark Over) จึงพิจารณาจากเกรเดียนท์ว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่ออากาศเบรคความถี่ ดังนั้นเราจึงได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{R}{r} = e = 2.718 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $1/E$ มีค่ามากที่สุดเมื่อ $R/r = e$ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนต์สูงสุดและ r/R ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่ r/R มีค่าน้อยกว่า $1/e$ หรือ 0.3679 เมื่ออากาศที่ผิวลวดตัวนำเบรคดาวน์ทำให้เสมือนลวดตัวนำใหญ่ขึ้นนั่นคือ r เพิ่มขึ้น แต่ E_{\max} กลับมีค่าลดลง ดังนั้นที่ $r/R < 1/e$ จะเกิดโคโรนา ก่อน นอกจากจะต้องเพิ่มศักดาไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงเกิดสปาร์คโอเวอร์ แต่ที่ $r/R > 0.3679$ E_{\max} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ r เพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีไม่มีการฟอร์มตัวของโคโรนาเกิดขึ้น เมื่อเกรเดียนต์ที่ผิวของลวดตัวนำสูงพอที่จะทำให้อากาศที่ผิวลวดตัวนำเบรคดาวน์ก็จะเกิดสปาร์คโอเวอร์ทันที



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์เกรเดียนต์สูงสุดกับ r/R

2.9 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ (Effect of Relative Air Density and Humidity)

ค่าศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์ข้ามระยะแกปนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของอากาศในบริเวณนั้น การเพิ่มของศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นอาจอธิบายได้ว่าเกิดจากความสามารถในรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโมเลกุลหรืออะตอมในอากาศมีค่าสูงขึ้น ผลของความหนาแน่นของอากาศสูงจะทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์สูงตามไปด้วย ค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในเมื่อความดันอากาศสูงขึ้นและค่าอุณหภูมิลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์จะแปรตามค่าความหนาแน่นของอากาศ โดยที่ความหนาแน่นของอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (σ) ที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 760 mm.Hg หาได้จาก

$$\sigma = 0.386 \left(\frac{p}{273 + t} \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ p = ค่าความดันของอากาศ, mm.Hg

t = อุณหภูมิ, °C

σ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกับบรรยากาศมาตรฐาน คือที่ 20 องศาเซลเซียส 760 mm.Hg จำเป็นต้องหาค่าความชื้นของอากาศเพื่อนำไปคูณกับค่าศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์มาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจริงในทางปฏิบัติภายใต้สภาวะบรรยากาศในขณะนั้น ซึ่งมาตรฐานของ I.E.C ค่า σ จะอยู่ระหว่าง 0.95 – 1.05 ดังนั้น

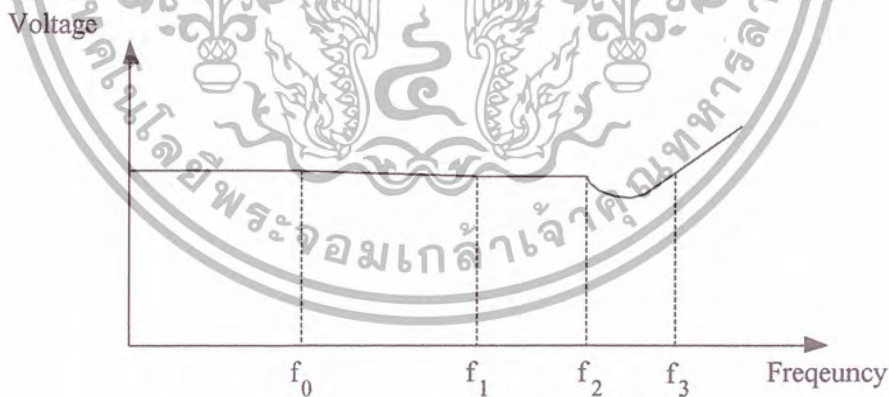
$$V = \sigma V_n \quad ; (0.95 \leq \sigma \leq 1.05) \quad (2.14)$$

โดย V = ค่าศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ความหนาแน่นของอากาศ

V_n = ค่าศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของ I.E.C

2.10 ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ความถี่สูง (Breakdown Voltage at High Frequency)

ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าและความถี่แยกได้เป็นห้าช่วงดังแสดงในรูปที่ 2.7 และศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ในแต่ละช่วงนั้นมีขบวนการทางด้านฟิสิกส์ต่างๆ ดังนี้ที่ความถี่ต่ำกว่า f_0 ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ทั้งนี้เป็นเพราะไอออนบวกหรือประจุอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างไอออไนเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลแรก มีเวลายาวพอที่จะเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโตรดและครึ่งไซเคิลต่อไปจึงไม่มีประจุอากาศเหลือจากครึ่งไซเคิลแรก และกระบวนการก็เริ่มใหม่เหมือนเดิม เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าความถี่ f_0 ส่วนหนึ่งของไอออนบวกในครึ่งไซเคิลแรกยังเหลืออยู่ทำให้เกิดประจุอากาศสะสมไปเรื่อยๆ ทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์มีค่าต่ำลง



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์และความถี่

สำหรับความถี่วิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ และระยะระหว่างอิเล็กโตรด เช่น ในช่วงว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอที่ความดันบรรยากาศ ความถี่วิกฤตมีค่า 1 MHz ระยะช่องว่าง 0.09 cm ความถี่วิกฤตมีค่า 110 kHz ที่ระยะช่องว่างอากาศ 0.45 cm และความถี่วิกฤตมีค่า 20 kHz ที่ช่องว่างอากาศ 2.5 cm จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงผกผันกับระยะช่องว่างอากาศโดยประมาณ ถ้าความดันก๊าซเพิ่มมากขึ้น ค่าความถี่วิกฤตต้องมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความถี่จนถึง f_1 แล้วหลังจากนั้นศักดาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรคความถี่ค่าเกือบคงที่เมื่อความถี่เพิ่มต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป เนื่องจากสภาวะสมดุลระหว่างการเกิดไอออน และการกระจายของประจุของอากาศไปยังอิเล็กโทรด เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง f_2 ต่อกันนั้นศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่ที่ลดลงที่ความถี่ในช่วงระยะเวลานี้ ในครึ่งไซเคิลสั้นเกินไปสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด ดังนั้นอิเล็กตรอนบางส่วนไม่สามารถข้ามอิเล็กโทรดได้ภายในช่วงครึ่งไซเคิล และเหลืออยู่ภายในช่องว่างทำให้การไอออไนเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลหลังดีขึ้น ดังนั้นศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่จึงมีค่าลดลง ที่ความถี่สูงกว่า f_2 ศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่จะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสูงกว่าศักดาไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง (Power Frequency) ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาในครึ่งไซเคิลสั้นมากจนอิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการไอออไนเซชันชุดแรกสมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มศักดาไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

2.11 ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Insulator or Dielectric Materials)

โครงสร้างทางกายภาพและคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นฉนวนที่ใช้กับความถี่สูง จะแตกต่างกันไปจากวัสดุฉนวนที่ใช้กับความถี่ต่ำ สิ่งที่สำคัญ คือ ค่ากำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริกจะมีค่ามากในกรณีความถี่สูง กำลังสูญเสียอันนี้จะทำให้เกิดความร้อน เป็นผลให้ศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่มีค่าต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่ที่ความถี่ต่ำของวัสดุฉนวน ฉะนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของวัสดุฉนวนหรือ ไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้

2.11.1 วัสดุฉนวนดีเลิศ (Ideal Insulation Material)

วัสดุฉนวนมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และแร่ (Mineral) วัสดุฉนวนมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติและสิ่งประดิษฐ์วัสดุฉนวนดีเลิศควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) ค่า Dielectric Strength สูงที่อุณหภูมิสูง
- 2) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
- 3) มีความคงทนที่อุณหภูมิสูง
- 4) มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ง่ายต่อการใช้งานและการนำไปใช้ ค่าความต้านทานจะไม่มี

ล้มเหลว (Failure) เมื่อเกิดการสั่น (Vibration)

ราคาวัสดุฉนวนจะแปรตามจำนวนหรือประมาณโดยตรง ฉะนั้นในการเลือกใช้วัสดุจึงต้องคำนึงราคาทางสถานะเศรษฐกิจ พร้อมทั้งมีคุณสมบัติความเข้มแข็งทางไฟฟ้าและทางกลที่สูงด้วย มีความคงทนต่อการติดตาม (Tracking) คือ การฟอร์มตัวเป็นทางเดินตัวนำถาวร (Permanent Conducting Path) บนผิวของฉนวน และส่วนมากการนำไฟฟ้า (Conduction) เกิดเนื่องจากการเสื่อมคุณสมบัติ (Degradation) ของฉนวนเองและมีการนำความร้อนที่ดีที่ศักดาไฟฟ้าเบรคความถี่สูง

2.11.2 ชนิดของวัสดุฉนวน (Type of Insulation Materials)

วัสดุฉนวนมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. ก๊าซ (Gases)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 49022 อย่างอสังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ของเหลว (Liquid)

3. ของแข็ง (Solids)

2.11.3 การเบรคดาวนของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown)

สารไดอิเล็กตริกจะเกิดการเบรคดาวน (คุณสมบัติของฉนวนเปลี่ยนแปลงไปเป็นตัวนำ) ก็ต่อเมื่อค่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมสารไดอิเล็กตริก หรือค่าเกรเดียนท์ (gradient) มีค่าสูงเกินกว่าค่าวิกฤติที่สารไดอิเล็กตริกจะทนได้ ค่าเกรเดียนท์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารไดอิเล็กตริก

1) การเบรคดาวนในก๊าซ (Breakdown in Gases) ก๊าซที่ใช้เป็นฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงควรมีคุณสมบัติ คือ เป็นก๊าซเฉื่อยและไม่ควรทำปฏิกิริยากับฉนวนอื่นๆ ที่ใช้ร่วมกันระหว่างที่เกิดการไอออนในเซชันไม่ควรมีปฏิกิริยาเคมีที่เป็นอันตรายต่อฉนวนเกิดขึ้น และควรมีจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อสามารถใช้ที่ความดันสูงๆ ได้และมี Dielectric Strength สูง เป็นตัวนำความร้อนที่ดี และข้อสำคัญราคาถูก อากาศมีข้อได้เปรียบก๊าซชนิดอื่นเมื่อเทียบทางด้านราคา ดังนั้นจึงเห็นอุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซที่ความดันสูงเป็นฉนวน แต่อากาศมีข้อเสีย คือ การไอออนในเซชันของอากาศทำให้เกิดโอโซน ไนตรัส และไนตริกออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะที่นำทำอุปกรณ์ และเกิดการ Oxidation ฉนวนที่ทำมาจากสารอินทรีย์ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนเลวลง ดังนั้นอาจใช้ก๊าซอื่นแทนอากาศ เช่น ไนโตรเจน SF_6 (Sulphur-Hexafluoride) ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าอากาศ เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าให้อิเล็กโตรดโดยที่ก๊าซอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองจะมีการเคลื่อนที่ของไอออน และอิเล็กตรอนอยู่เล็กน้อยตามแนวเส้นแรงของสนามจะทำให้มีกระแสไหล ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเพิ่มขึ้นกระแสก็จะไหลมากขึ้น เนื่องจากมีจำนวนไอออนวิ่งไปที่อิเล็กโตรดมากขึ้น เมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อไปอีกก็จะเกิดกระแสไหลอย่างมากนั่นหมายถึงมีการไอออนในเซชันของก๊าซ และถ้าเพิ่มขึ้นต่อไปจนถึงจุดๆ หนึ่งที่ก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำ ศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพนี้เรียกว่า ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน (Breakdown Voltage) กระบวนการต่างๆ ซึ่งเกี่ยวกับการเกิดกลไกการเบรคดาวนในก๊าซ สามารถแยกออกได้เป็น 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเกิดไอออน กระบวนการสูญเสียไอออน และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทด (Cathode process)

2) การเบรคดาวนในของเหลว (Breakdown in Liquid) เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่จุ่มอยู่ในฉนวนของเหลวจะเกิดกระแสไหล และเมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าสูงขึ้นก็จะเกิดการสปาร์ค (Spark) ระหว่างอิเล็กโตรดในของเหลว ทำให้เกิดการไหลของกระแสมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับความต้านทานของวงจร นอกจากนั้นยังทำให้เกิดแสงเรืองระหว่างอิเล็กโตรดเกิดฟองอากาศ และส่วนประกอบอย่างอื่นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี เกิดครีเอกซ์ที่หน้าอิเล็กโตรดและความดันในของเหลวเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ทฤษฎีสำหรับกลไกการเบรคดาวนแบบเดียวกันในของเหลวแยกออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแรกอาศัยการอธิบายการเบรคดาวนลักษณะเดียวกับการเกิดเบรคดาวนในก๊าซคือ เกิดการไอออนในเซชันของอะตอมภายในสนามไฟฟ้า โดยที่อิเล็กตรอนถูกสมมติว่าหลุดออกจากหน้าคาโทด ด้วยกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออก อันเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field Emission) หรือเนื่องจากความร้อน (Thermal Emission) ของเหลวที่ใช้เป็นฉนวนในทางปฏิบัติอย่างกว้างขวางได้แก่ น้ำมัน ถ้าเป็นน้ำมันที่บริสุทธิ์หรือไม่มีสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจ็ปจะมีค่า Breakdown Strength สูงกว่า 1 MV/cm คุณสมบัติของน้ำมันบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นฉนวน คือ ค่า breakdown Strength ไม่ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาทำอิเล็กโตรดและค่า Breakdown Strength ลดลงเมื่อเพิ่มระยะช่องว่างมากขึ้นและไม่ขึ้นกับความดันของน้ำมัน แต่ถ้าเป็นน้ำมันที่มีส่วนเจ็ปด้วยก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจนหรือออกซิเจน ค่า Breakdown Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

3) การเบรคดาวน์ในของแข็ง (Breakdown in Solids) ฉนวนโดยทั่วไปจะมีความต้านทานสูง ความต้านทานของฉนวนจะไม่มีความสัมพันธ์กับค่า Dielectric Strength ซึ่งจะพิจารณาจาก Gradient หรือความหนาแน่นฟลักซ์ ถ้าสนามไฟฟ้าที่ใช้กับฉนวนมีค่าสูงกว่าค่า Dielectric Strength ของฉนวนก็จะเกิดการเบรคดาวน์ของฉนวนขึ้น โดยทั่วไปเมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าคร่อมฉนวนจะเกิดสูญเสียค่าความเป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric Losses) หรือบางทีเรียกว่า ไดอิเล็กตริกฮิสเตอร์ซิส (Dielectric Hysteresis) อากาศมีความต้านทานสูงมาก แต่มีค่า Dielectric Strength ไม่สูงนัก การเบรคดาวน์ในของแข็งมีกลไกในการเบรคดาวน์หลายแบบ กลไกการเบรคดาวน์ในของแข็งเปลี่ยนไปตามขนาดของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าสูงมากของแข็งจะเกิดการเบรคดาวน์ในเวลาอันสั้น เมื่อศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ลดลงเวลาที่ใช้ในการเบรคดาวน์ก็เพิ่มขึ้นและกลไกการเบรคดาวน์จะเปลี่ยนไปด้วย

2.11.4 การนำและการดูดกลืน (Conduction and Absorption)

ฉนวนของแข็ง รวมทั้งของเหลวบางชนิดเมื่อใช้ศักดาไฟฟ้าคร่อมอิเล็กโตรดจะทำให้เกิดผลของการนำและการดูดกลืนในอิเล็กโตรดในฉนวน นั่นคือ มีกระแสไหลนั่นเอง การนำกระแสเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวของไอออนที่เรียกว่าไอออนไนเซชัน และการดูดกลืน (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีศักดาไฟฟ้า จะทำให้ประจุถูก Charge เข้าไปในฉนวน ไดอิเล็กตริก

2.11.5 ตัวประกอบของกำลัง (Power Factor; $\cos\theta$)

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าสลับให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor) ศักดาไฟฟ้าที่คร่อมฉนวนจะเกิดความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การดูดกลืน (Absorption) หรือบางทีเรียกว่าไดอิเล็กตริกฮิสเตอร์ซิส ผลจากการสูญเสียอันนี้ทำให้เฟสของกระแสจะไม่นำหน้าศักดาไฟฟ้าไปเป็น 90° จริงๆ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 90° และเป็นค่าของมุมที่เกิดจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริก เรียกว่า มุมของการสูญเสียค่ากระแสของตัวประจุที่มีคุณสมบัติที่ดีสามารถหาได้จาก

$$I = \omega CV \quad (2.15)$$

และค่ากำลังสูญเสีย

$$P = VI\cos\theta \quad (2.16)$$

$$P = VI\sin\delta \quad (2.17)$$

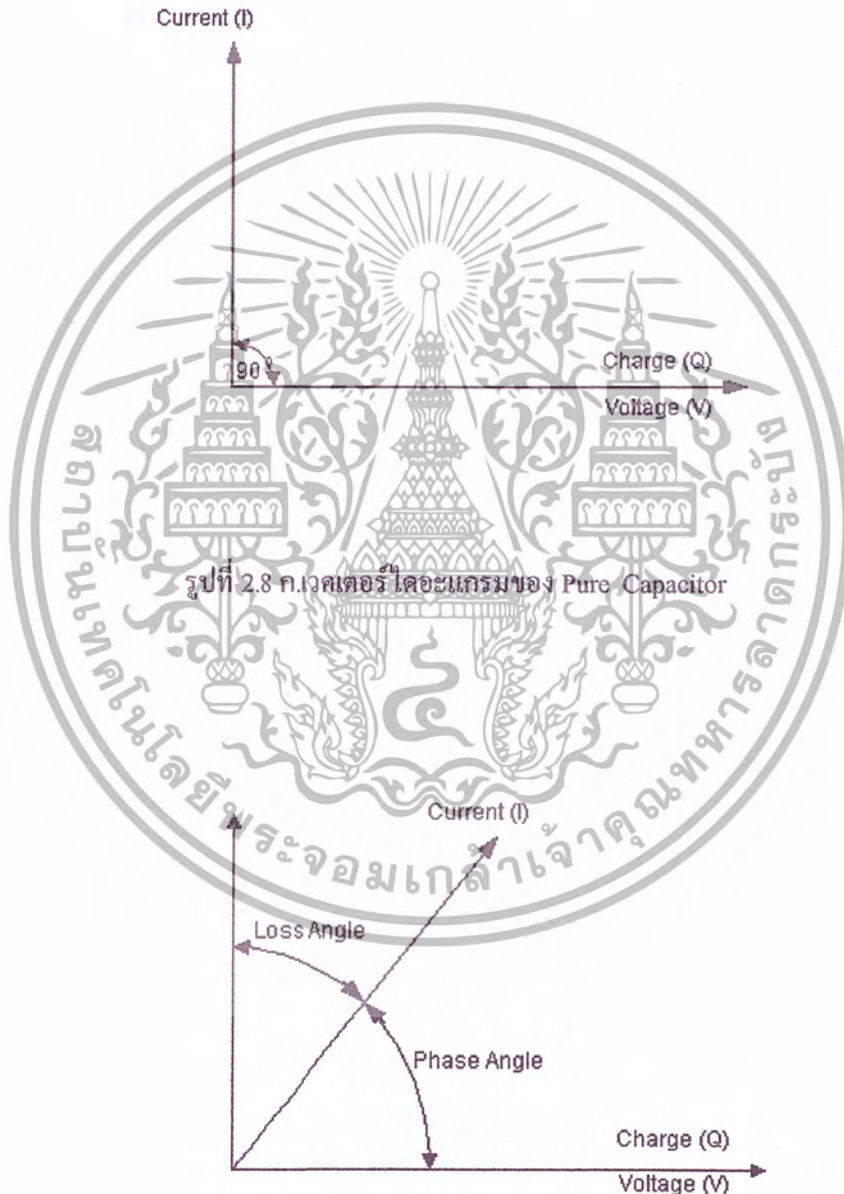
$$P = \omega CV\sin\delta \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \omega CV^2 \tan \delta \quad (\text{watt}) \quad (2.19)$$

โดยที่ $\delta = \text{Loss angle } (90 - \theta)$

ดังแสดงไว้ในรูป 2.8 ก. และ ข.



รูปที่ 2.8 ข. เวกเตอร์ไดอะแกรมของ Imperfect Capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulation)

2.12.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)

1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของเหลวจำพวกน้ำมันวานิช , Epoxy และฉนวนอื่นๆ ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพื่อบ่งบอกถึงคุณสมบัติของของเหลวแต่ละชนิด ส่วนของแข็ง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ค่าของความหนาแน่น

2) การดูดกลืนความชื้น (Moisture Absorption) เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นเหตุให้จุดเบรคความถี่ต่ำลงได้ในวัสดุฉนวนต่างๆ โดยเฉพาะฉนวนน้ำมัน

3) ผลของความร้อน (Thermal Effect) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาเลือกวัสดุฉนวนมาใช้ หลักการที่จะพูดถึง คือ จุดหลอมเหลว อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการอ่อนตัวของพลาสติก อย่างเช่น PVC ที่นำมาเป็นแกนของขดลวดแรงสูง ซึ่งอายุการใช้งานของวัสดุฉนวนย่อมจะขึ้นอยู่กับผลของความร้อนด้วย

2.11.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

1) ความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) กระแสที่สามารถไหลผ่านในวัสดุฉนวนโดยอมขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวน และผลของความชื้นที่จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะเปลี่ยนแปลง หรืออาจเป็นทางเดินของตัวนำบนผิวของวัสดุฉนวนที่เรียกว่า Film on The Surface

2) ค่า Dielectric Strength เป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่สามารถทนความเค้นของสนามไฟฟ้าได้ โดยไม่เกิดความเสียหายต่อไดอิเล็กตริก

3) การเกิดประกายไฟวบตามผิวฉนวน (Flash Over) วัสดุที่เป็นของแข็งอย่างเช่น ลูกถ้วยฉนวนผิวเรียบขัดมัน เมื่อมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนจะทำให้ค่า Dielectric Strength ของลูกถ้วยฉนวนนั้นสูงกว่าค่า Dielectric Strength ของอากาศ เมื่อศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมลูกถ้วยเพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศรอบๆ ลูกถ้วยเกิดการเบรคความถี่เป็นประกายวบ ไฟขึ้นรอบๆ ผิวลูกถ้วยลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Flash Over

4) ค่า Permittivity ปริมาณของประจุของตัวเก็บประจุที่ประกอบแผ่นตัวนำสองแผ่นหรือมากขึ้นไป จะหาได้จากค่า Permittivity ที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างตัวนำ คือ คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก

5) เพาเวอร์แฟคเตอร์และค่าสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Power Factor and Dielectric Losses) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะแปรตามค่าความถี่และอุณหภูมิ และค่าสูญเสียของไดอิเล็กตริกจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.13 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน

การฉนวนเป็นสิ่งที่จำเป็นในการสร้างและใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานทางด้านแรงสูงที่ใดมีสนามไฟฟ้าที่นั่นต้องมีการฉนวน เพื่อป้องกันไม่เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้ามาใกล้หรือสัมผัส หรือป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า หรือระหว่างสายไฟฟ้ากับดิน การฉนวนแก่ส่วนที่มีไฟฟ้าก็ยอมทำได้ง่ายถ้ามีที่ว่างๆ มากพอ หรือแรงดันนั้นต่ำกว่า 100 V

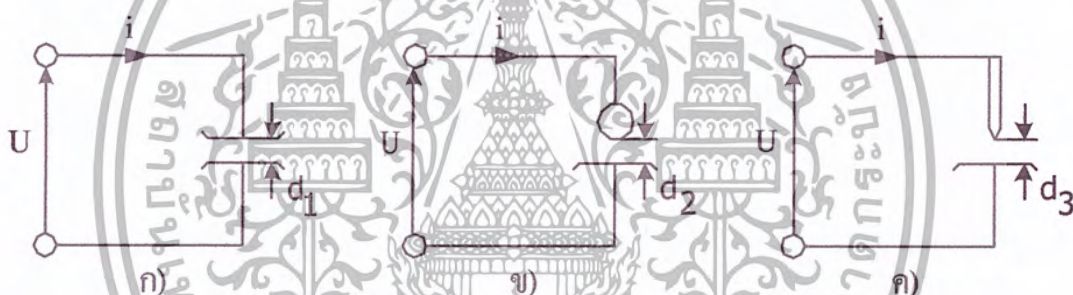
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวนซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน

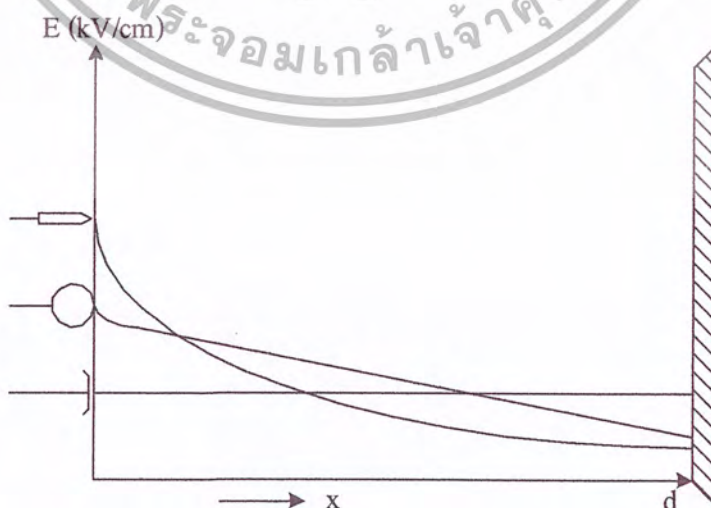
2.13.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนได้ โดยไม่ได้เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรคดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) คือ เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นราบ (Plate to Plate) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_0 ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$$E_0 = f(\text{ลักษณะแห่งเรขาคณิตอิเล็กโตรด, ลักษณะคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกและเวลา})$$



รูปที่ 2.9 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน



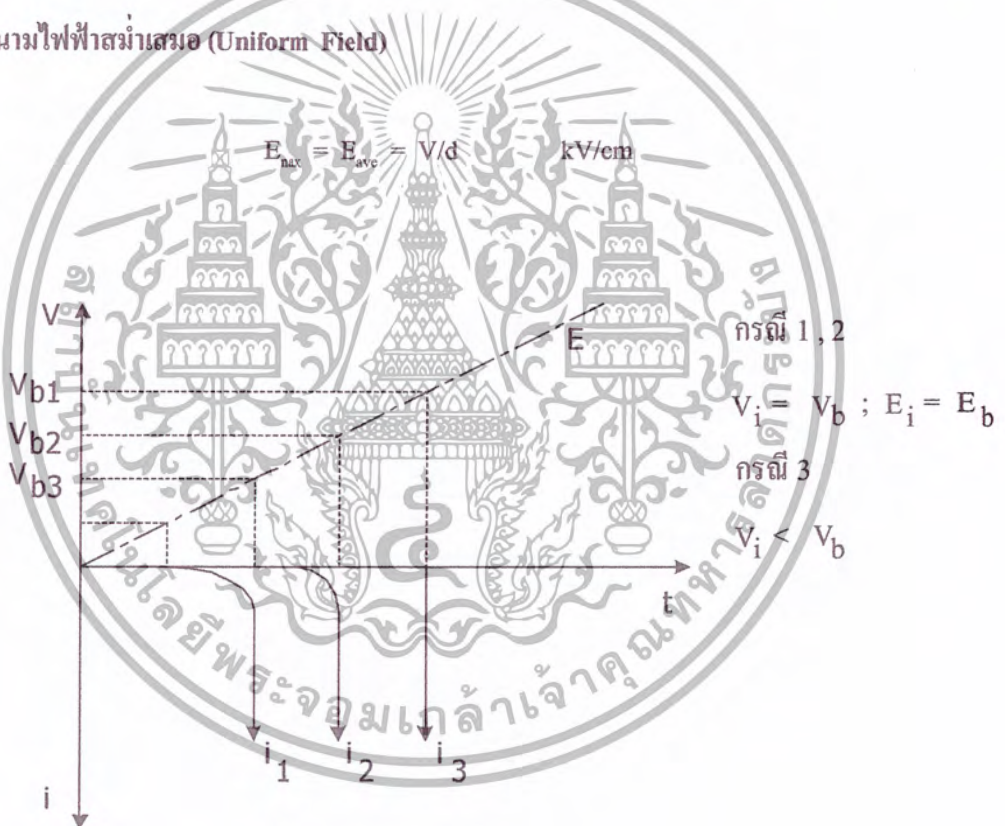
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าป้อนแรงดันที่อิลีคโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.9 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคความจะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะห่างให้ $d_1 = d_2 = d_3 = d$ ก็ตาม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 และฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ตายตัวที่ค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิลีคโตรดในขณะที่เบรคความเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ เช่น แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Efficiency Factor) ทำให้มีลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นแบบต่างๆ ได้แก่

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)
- ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)

2.13.2 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)



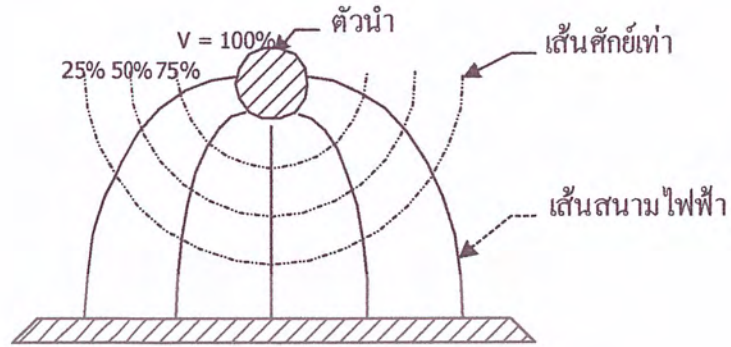
รูปที่ 2.11 ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

∴ ค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

$$E_b = V_b/d \quad \text{kV/cm} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3 สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)



รูปที่ 2.12 การกระจายของเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

$$E_{\max} = V/(d \times \eta^*) \quad (2.21)$$

โดยที่ $\eta^* = E_{\text{ave}} / E_{\max} \leq 1$
 เมื่อ $\eta^* =$ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Efficiency Factor or Field Utilization Factor)

$$E_{\text{ave}} \cong V/d \quad (2.22)$$

$$E_b = V_b/(d \times \eta^*)$$

2.12.3 สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)

ค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) สามารถหาได้จากสมการเดียวกันกับในสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย คือ

$$E_b = V_b/(d \times \eta^*) \quad (2.23)$$

2.14 ฉนวนฉนวน (Insulators)

ฉนวนฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึด หรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าดิน ยึดตัวนำไฟฟ้าได้อย่างมั่นคงไม่เกิดการแกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้าใกล้กันจนเกิดการสปาร์คหรือเบรคดาวน์ และเกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยตัวกลางเป็นฉนวนกัน คือ อากาศ ก๊าซ หรือของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.1 คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulators)

ในการใช้งานฉนวนด้วยฉนวนในขณะที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่นั้น คือ ต้องรับและคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าใช้งาน หรือแรงดันเสิร์จ (Surge) ที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ฉนวนด้วยฉนวนยังต้องรับแรงกลจากน้ำหนักของสายไฟ แรงกลไฟฟ้าจากกระแสลัดวงจร แรงลม ยิ่งกว่านั้นต้องมีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากไฟตามผิวหรือกระแสลัดวงจร กล่าวคือฉนวนที่ใช้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน ในกรณีฉนวนด้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนนั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดินเหนียว ดินขาว หินฟันม้า หินแก้ว และ อลูมินา

2.14.2 รูปลักษณะสมบัติของฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไป (Characteristics of Insulators)

1. มีปีกเป็นชั้น หรือครีปได้ปีกเพื่อเพิ่มระยะรั่ว (Leakage Distance) หมายถึง ผลรวมของระยะที่สั้นที่สุด ที่วัดไปตามผิวฉนวนระหว่างส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าของฉนวนที่ใช้ในการทดสอบตามผิวแห้ง ที่อาบด้วยน้ำยาเคลือบกึ่งตัวนำนั้นรวมเป็นหนึ่งของระยะรั่วด้วย และระยะอาร์ค (Arcing Distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่ปานตัวกลางที่ล้อมรอบฉนวนด้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโตรด และยังให้ผิวแห้งที่คงสภาพอยู่ได้ในสภาวะฝนตก
2. ความกว้างของปีกชั้นฉนวนด้วยฉนวน และความหนาของเนื้อฉนวนด้วยฉนวน (ระหว่างอิเล็กโตรดด้านบนและอิเล็กโตรดด้านล่าง) ต้องมีความสัมพันธ์กัน ในด้านความคงทนต่อแรงดันเกิน คือ ความคงทนต่อแรงดันเกินที่เกิดจากไฟตามผิว จะต้องน้อยกว่าความคงทนต่อแรงดันเจาะผ่าน (Puncture Voltage) หมายถึง ค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าซึ่งในสภาวะที่กำหนดจะเกิดการปล่อยประจุที่ล้นทะลุผ่านฉนวนด้วยฉนวนทำให้เสียสภาพการเป็นฉนวนอย่างถาวร
3. ผิวของฉนวนด้วยฉนวนโค้งไปตามเส้นศักย์เท่า (Equipotential Line) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนด้วยฉนวนมีค่าน้อยที่สุด
4. ผิวของฉนวนด้วยฉนวนต้องเคลือบเพื่อทำให้ผิวมัน ทำให้สิ่งสกปรกและฝุ่นละอองเกาะผิวได้ยาก และเมื่อฝนตกก็จะชะล้างออกได้ง่าย ทำให้สามารถทนต่อแรงดันเกินได้สูงขึ้น สารที่เคลือบผิวของฉนวนด้วยฉนวนจะต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Expansion) เท่ากับเนื้อพอร์ซเลน
5. เนื้อวัสดุต้องไม่ดูดซึมความชื้น ทำให้มีความคงทนต่อแรงดันเกินได้สูง มิฉะนั้นอาจเกิดสารเจาะทะลุได้ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น และมีความคงทนต่อแรงกลได้สูง

2.14.3 ชนิดของฉนวนด้วยฉนวน (Type of Insulators)

- 1) ฉนวนด้วยก้านตรง (Pin Insulator) ฉนวนด้วยก้านตรงเป็นฉนวนที่ใช้ยึดสายแรงสูงแบบตรึงอยู่กับที่ โดยพาดสายไฟฟ้าอยู่ในร่องพาดสายไฟที่อยู่บนบนของฉนวนด้วยฉนวน ตัวฉนวนด้วยฉนวนจะประกอบด้วยปีกหลายชั้นด้านในมีรูใส่ก้านยึดเป็นเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยก้านตรง

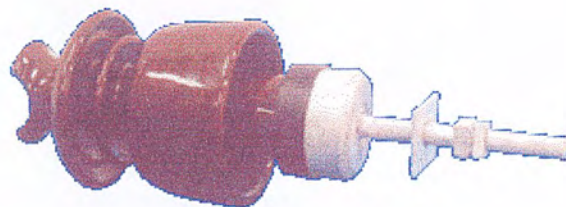
2) ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก (Fox Type Pin Insulator) มีลักษณะพื้นฐานแบบลูกถ้วยก้านตรง เพียงแต่เพิ่มระยะรั้ว โดยเฉพาะระยะรั้วป้องกันจะยาวกว่าลูกถ้วยก้านตรงธรรมดา ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้งานในที่ที่มีความเปราะเปื้อนสูง เช่น ชายทะเล

3) ลูกถ้วยแท่ง (Line Post Insulator) จะมีลักษณะคล้ายลูกถ้วยก้านตรงแต่มีคอรยาวกว่า ส่วนยอดมีบารับสายไฟ ส่วนล่างมีแท่นโลหะยึดก้านตรง เนื่องจากมีลวดคั้นยาวจึงมีข้อเด่นที่ไม่เกิดการเจาะทะลุ



รูปที่ 2.14 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยแท่ง

4) ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin Post Insulator) ทำหน้าที่เช่นเดียวกับลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก คือใช้งานในย่านที่มีความเปราะเปื้อนสูง แต่จะดีกว่าเพราะไม่เกิดการเจาะทะลุเนื่องจากแกนเป็นแบนคอดันของเนื้อพอร์ซเลน



รูปที่ 2.15 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยแท่งก้านตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ลูกถ้วยหลัก (Post Insulator) เป็นลูกถ้วยที่มีลักษณะคล้ายลูกถ้วยแต่ง เพียงแต่ยอดบนและฐานล่างจะเป็นหัวครอบโลหะ ซึ่งเป็นที่ยึดตัวเองหรือยึดตัวต่อที่นำมาซ้อนต่อมีปีกกรีบ เช่นเดียวกับลูกถ้วยคอตันยาว ใช้สำหรับตรึงยึดตัวนำไฟฟ้าให้มั่นคง โดยทั่วไปใช้สำหรับยึดบัสบาร์หรือตัดคอน



รูปที่ 2.16 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยหลัก

6) ลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator) เป็นลูกถ้วยแรงดันสูงสามารถห้อยแขวนต่อกันเป็นพวงได้ ส่วนบนของลูกถ้วยจะมีฝาครอบโลหะ มีรูหรือช่องที่จะไปห้อยเข้ากับก้านที่อยู่ด้านล่างของลูกถ้วยลูกบนได้ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงมากขึ้นจำนวนลูกถ้วยก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยแขวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน (Solid Core Suspension Insulator) มีลักษณะเหมือนลูกถ้วยแขวนสอง ลูกมาต่อกันด้วยเนื้อพอร์ซเลนเป็นคอดันจะดีกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา ก็ตรงที่ว่าไม่เกิดการเจาะทะลุหัวของลูกถ้วย

8) ลูกถ้วยคอดันยาว (Long Rod Insulator) เป็นลูกถ้วยแรงดันสูงมีปีกเป็นชั้นเหมือนลูกถ้วยก้านตรง ตัวลูกถ้วยเป็นแกนตันสามรถแขวนห้อยต่อกันได้

2.14.4 ระยะอาร์คแห้ง (Dry-Arcing Distance)

ระยะอาร์คแห้ง หมายถึง ระยะสั้นที่สุดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโตรดในการทดสอบการวางไฟตามผิวแห้ง ระยะอาร์คแห้งของลูกถ้วยจำนวนแต่ละชนิดจะมีเปอร์เซ็นต์ของระยะในอากาศ และระยะตามผิวที่ตกต่างกันตามรูปลักษณะ และการใช้งานของลูกถ้วยแขวนโดยที่

$$D = g + s$$

(2.24)

เมื่อ

D = ระยะอาร์คแห้ง

g = ระยะส่วนที่เป็นอากาศ

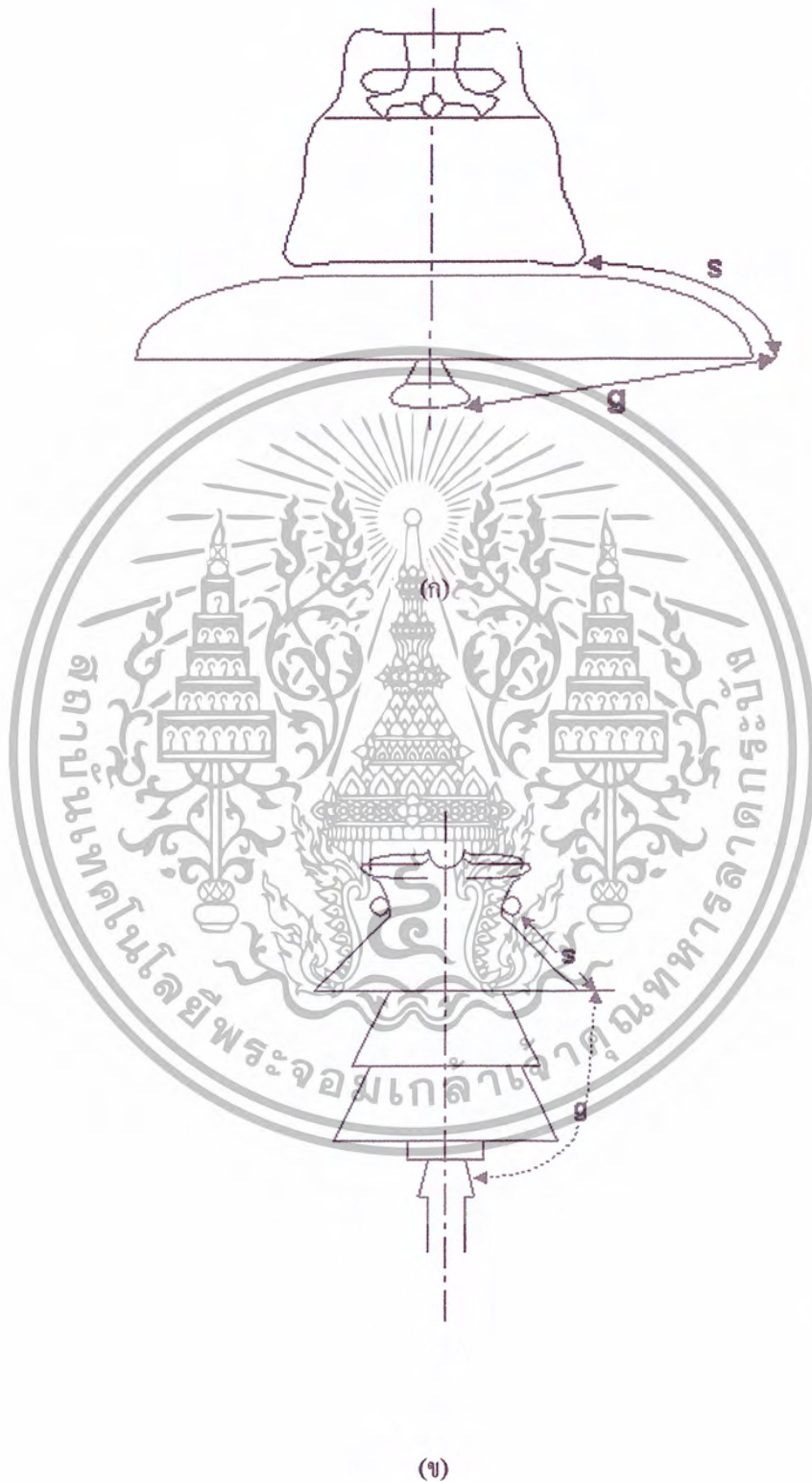
s = ระยะส่วนที่เป็นผิว

ลูกถ้วยจำนวนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะระยะอาร์คแห้ง ระยะส่วนที่เป็นอากาศและระยะส่วนที่เป็นผิวจำนวนแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก), ข), ค), ง) และ จ) และค่าของระยะอาร์คแห้ง ส่วนระยะที่เป็นส่วนอากาศและระยะส่วนที่เป็นผิวของลูกถ้วยทั้ง 5 แบบแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระยะอาร์คแห้งระยะส่วนที่เป็นอากาศและระยะส่วนที่เป็นผิวของลูกถ้วย

ลูกถ้วยจำนวน	ระยะอาร์คแห้ง (cm)	ระยะส่วนที่เป็นอากาศ (cm)	ระยะส่วนที่เป็นผิว (cm)
ลูกถ้วยแขวน	21.49	10.56	10.93
ลูกถ้วยก้านตรง	24.66	17.19	7.49
ลูกถ้วยก้านตรงคอดัน	26.33	19.77	6.46
ช่องแกปอิเล็กโตรด หัวครอบก้านตรง	21.49	21.49	-
ลูกถ้วยแท่งผิวเรียบ	26.23	-	26.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



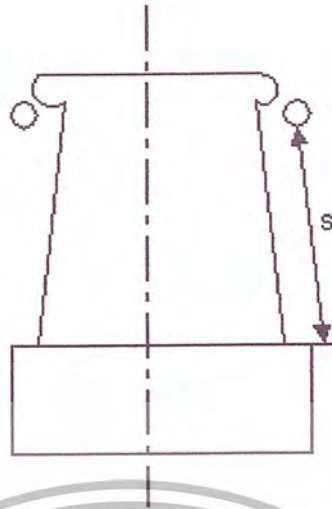
รูปที่ 2.18 ระยะเวลาแห่งของลูกถ้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 (ต่อ) ระยะเวลาการแห้งของลูกถ้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 2.18 (ต่อ) ระยะอาร์คแห้งของลูกถ้วยฉนวน

2.14.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน

อิเล็คโตรดที่ถูกด้วยฉนวนทำหน้าที่ยึดหรือรองรับน้ำหนัก มีลักษณะเป็นแบบอิเล็คโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้าเกินที่สูงพอ เนื่องจากสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นการเกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยจึงเป็นปรากฏการณ์เกิดเบรคความไวของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสติมเมอร์ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความไวตามผิวลูกถ้วยจึงมีหลายรูปแบบซึ่งให้ผลที่แตกต่างกัน

2.15 แกปทรงกลม (Sphere Gap)

แกปทรงกลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยลูกทรงกลมโลหะสองลูก วางห่างกันในอากาศ ถ้าค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างลูกทรงกลมมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์ ค่าความต่างศักย์ที่ทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์ จะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริกของอากาศและขนาดของลูกทรงกลมตลอดจนระยะห่างของช่องว่างและตัวประกอบอื่นๆ อีก สมการสำหรับหาค่าเกรเดียนท์ของทรงกลมขนาดใหญ่สองลูกรัศมีเท่ากัน และวางห่างกันด้วยระยะหนึ่งนั้นแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่หนึ่งลูกทรงกลมหนึ่งต่อลงดิน เพราะลูกทรงกลมที่ต่อลงดินนั้นค่าเกรเดียนท์ของลูกทรงกลมขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบเช่น ก้านที่ต่อลูกทรงกลมมีขนาดและความยาวเท่ากัน เป็นต้น

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ อาศัยการเกิดสปาร์ค หรือเบรคความไวระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิซาร์จของก๊าซ คือ สปาร์คหรือเบรคดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือจะเกิดการเบรคดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงขึ้นถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรคดาวนสถิติ (Statistic Breakdown Voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอนทำซ้ำเดิมได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรคดาวนนั้นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศหรือก๊าซ ระยะห่างระหว่างทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม นั่นคือ

$$U_b = f(d, D, \delta) \quad (2.25)$$

เมื่อ U_b = แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ค
 d = ระยะช่องว่างระหว่างทรงกลม
 D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม
 δ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

ตามมาตรฐานสากล IEC NO. 52 จะกำหนดค่าแรงดันเบรคดาวนของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความดันอากาศ 760 mm.Hg และอุณหภูมิ 20 °C ฉะนั้นค่าแรงดันเบรคดาวนที่ความดันใด อุณหภูมิใด เมื่อจะเทียบกับค่ามาตรฐาน จะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$U_{b0} = U_b / k_d \quad (2.26)$$

เมื่อ U_{b0} = เป็น ค่ามาตรฐาน คือสภาวะมาตรฐานการ
 U_b = เป็น ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง
 k_d = เป็นตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ ที่คำนวณได้จากสมการ

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = 0.386 \left(\frac{p}{273 + t} \right) \quad (2.27)$$

โดยที่ p เป็น ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์ เป็น mm.Hg
 t เป็น อุณหภูมิของห้อง ในขณะที่วัดได้เป็น
 k_d เป็น ตัวประกอบแปลงผันจะเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.05

2.15.1 ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศโดยไม่ต่อลงดิน

กรณีนี้ที่ผิวของลูกทรงกลมในแนวที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{fV}{x} \quad (2.28)$$

เมื่อ V = ศักย์ไฟฟ้าระหว่างลูกทรงกลม, kV
 f = ฟังก์ชันของ x/R โดยที่ R เป็นรัศมีของทรงกลม
 x = ระยะระหว่างผิวของลูกทรงกลมในแนวที่เชื่อมทรงกลม

สมการของ f สามารถคำนวณเขียนได้เป็นสูตรดังนี้

$$f = \frac{\frac{x}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{x}{R} + 1\right)^2 + 8}}{4} \quad (2.29)$$

2.15.2 ลูกทรงที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศที่ลูกทรงกลมหนึ่งต่อลงดิน

เกรเดียนท์ที่ผิวของลูกทรงกลมในแนวเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลม ซึ่งจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{f_0 V}{x} \quad (2.30)$$

สำหรับ f_0 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ x/R นั้น ค่าที่ได้จากสูตรและการทดลองไม่ตรงกัน ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบบางอย่างเช่น ก้านที่ต่อกับลูกทรงกลม สายที่ต่อ เป็นต้น ที่ทำให้เกรเดียนท์เปลี่ยนไป ค่าของ f_0 ที่วัดได้ต่างจากค่า f ไปอย่างไร ลูกทรงกลมที่วางห่างกันควมระยะทางระหว่างผิวไม่เกินสองเท่าของรัศมีของลูกทรงกลมจะไม่เกิดโคโรนาเลย แต่จะเกิดสปาร์ค โอเวอร์เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูง ถ้าระยะห่างระหว่างลูกทรงกลมมีค่ามากกว่าสองเท่าของรัศมีลูกทรงกลม เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างลูกทรงกลม จะเกิดโคโรนาก่อนที่จะเกิดสปาร์ค โอเวอร์ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำให้เกิด สปาร์ค โอเวอร์กับระยะห่างของแกป

2.16 การทดสอบลูกถ้วยฉนวน

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.354-2523: ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน ได้แบ่งการทดสอบลูกถ้วยฉนวนออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test)
- 2) การทดสอบรองรับ (Acceptance Test)
- 3) การทดสอบประจำ (Routine Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.1 การทดสอบเฉพาะแบบ

หมายถึง การทดสอบเพื่อตรวจสอบหรือพิสูจน์ว่าลักษณะการออกแบบคุณภาพ เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ การทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าตามผิวในสภาพแห้งและเปียกด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ
- 2) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
- 3) การทดสอบแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Influence Voltage Test = RIV) จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณภาพลูกถ้วย เพื่อใช้รองรับและยึดสายไฟแรงสูง จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณสายไฟพาดยึดติดกับลูกถ้วย หรือโลหะประกอบติดกับลูกถ้วย

จนวน ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือโคโรนา และส่งคลื่นสั้นในย่านความถี่วิทยุสื่อสารแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ฉะนั้นลูกถ้วยจนวนที่นำมาใช้ยึดสายในระบบส่งจำหน่าย โดยเฉพาะในย่านชุมชนหรือในเมืองย่อมให้มีคลื่นรบกวน (RIV) ได้ไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ตามมาตรฐาน ANSI กำหนดค่า RIV เป็น μV

ในกรณีสภาพบรรยากาศไม่ใช่สภาวะมาตรฐาน ต้องใช้แฟคเตอร์แก้ความหนาแน่นบรรยากาศ และแฟคเตอร์แก้ความชื้นในบรรยากาศ

2.16.2 การทดสอบรองรับ

หมายถึง การตรวจสอบคู่วัดคุณภาพผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ว่ายังมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ การทดสอบรับแรงทางไฟฟ้า ก็คือ การทดสอบความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า เป็นการทดสอบที่เลียนแบบการใช้งานจริง เพราะลูกถ้วยในขณะที่ใช้งานนั้นจะต้องรับทั้งแรงกล และความเครียดสนามไฟฟ้า

การทดสอบรับแรงทางไฟฟ้าอีกประการหนึ่งก็คือ การทดสอบเจาะผ่าน (Puncture) เป็นการทดสอบแตกสลายเพื่อต้องการตรวจสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อลูกถ้วย(อาจเป็นพอร์ซเลนหรือแก้ว)

2.16.3 การทดสอบประจำ

หมายถึง การทดสอบที่ทำเป็นประจำในโรงงาน เป็นการทดสอบกับลูกถ้วยจนวนทุกลูก เพื่อตรวจสอบว่าลูกถ้วยนั้นไม่มีความบกพร่องจากการผลิต การทดสอบประจำทางไฟฟ้าของลูกถ้วยจนวน ได้แก่ การทดสอบวบไฟตามผิว ซึ่งอาจจะใช้แรงดันความถี่สูงแบบหน่วง (Damped High Frequency Voltage) มีความถี่ประมาณ 200 kHz ซึ่งได้จากหม้อแปลงเตสลาให้เกิดวบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที หรืออาจจะทดสอบวบไฟด้วยความถี่ต่ำให้เกิดวบไฟตามผิวแห้งต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที

บทที่ 3

การออกแบบและจัดสร้างหม้อแปลงเตสลา

จากทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลาจะนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญหลายส่วน ดังนี้ แหล่งจ่ายหม้อแปลงแรงดันต่ำ ตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ ขดลวดทางด้านแรงดันสูง ชุดสปาร์คแกป ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกประกอบรวมอยู่บนฐานรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก

3.1 เงื่อนไขของการออกแบบ

ในการออกแบบสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นสิ่งแรก คือ ขนาดของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง C_2 ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าแรงดันและค่าความถี่ด้านจ่ายออกจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อขนาดของโหลด C_2 มีการเปลี่ยนแปลง หม้อแปลงเตสลาที่จะต้องออกแบบนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่มีการวางไฟตามผิวที่ 50 Hz ได้ที่ 200 kV หรือคิดเป็นค่าขดที่ประมาณ 280 kV และมีความถี่ตามที่มาตรฐานกำหนดไม่น้อยกว่า 100 kHz กำหนดพิกัดหม้อแปลงเตสลาดังต่อไปนี้

- 1) แรงดัน ไฟฟ้าพิกัดทางด้านแรงสูง 400 kV
- 2) ความถี่พิกัด 200 KHz
- 3) แรงดัน ไฟฟ้าป้อนเข้า 0-15 kV_{rms}

การออกแบบและจัดสร้างหม้อแปลงเตสลา ในส่วนของการจัดสร้างจะเริ่มจากการหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ โหลด C_2 ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) ความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 50 PF
- 2) ความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray Capacitance) ของขดลวดแรงสูงมีค่าประมาณ 10 pF
- 3) ความจุไฟฟ้าของแกปทรงกลม (Sphere Gap) มีค่าประมาณ 5 - 10 pF
- 4) ความจุไฟฟ้าของห้วงลวดความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 5 - 10 pF

โดยเมื่อคิดความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ค่าสูงสุด 50 pF รวมความจุไฟฟ้าต่างๆแล้วจะได้ค่าความจุไฟฟ้า C_2 ประมาณ 90 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเลือกพิกัดหม้อแปลงจ่ายกำลัง

ในการเลือกแหล่งจ่ายหม้อแปลงจ่ายกำลังมีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ C_1 ในโครงการนี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงที่ใช้สำหรับจุดหลอดนีออน (Neon Sign Transformer) โดยมีขนาดพิกัดดังนี้

- 1) Primary : 230 V 2.0 A
- 2) Secondary : 15 kV 30 mA
- 3) ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 450 VA 50 Hz

โดยที่นำเอาหม้อแปลงดังกล่าวจำนวน 4 ตัวมาต่อขนานกัน เพื่อให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิ 120 mA จากนั้นจะทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจากสมการข้างล่าง

$$\begin{aligned} Z &= V_{\text{rms}} / I_{\text{sc}} \\ &= 15000 \text{ V}_{\text{rms}} / 120 \text{ mA} \\ &= 125 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 หม้อแปลงจ่ายกำลังด้านแรงต่ำ

3.3 การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1)

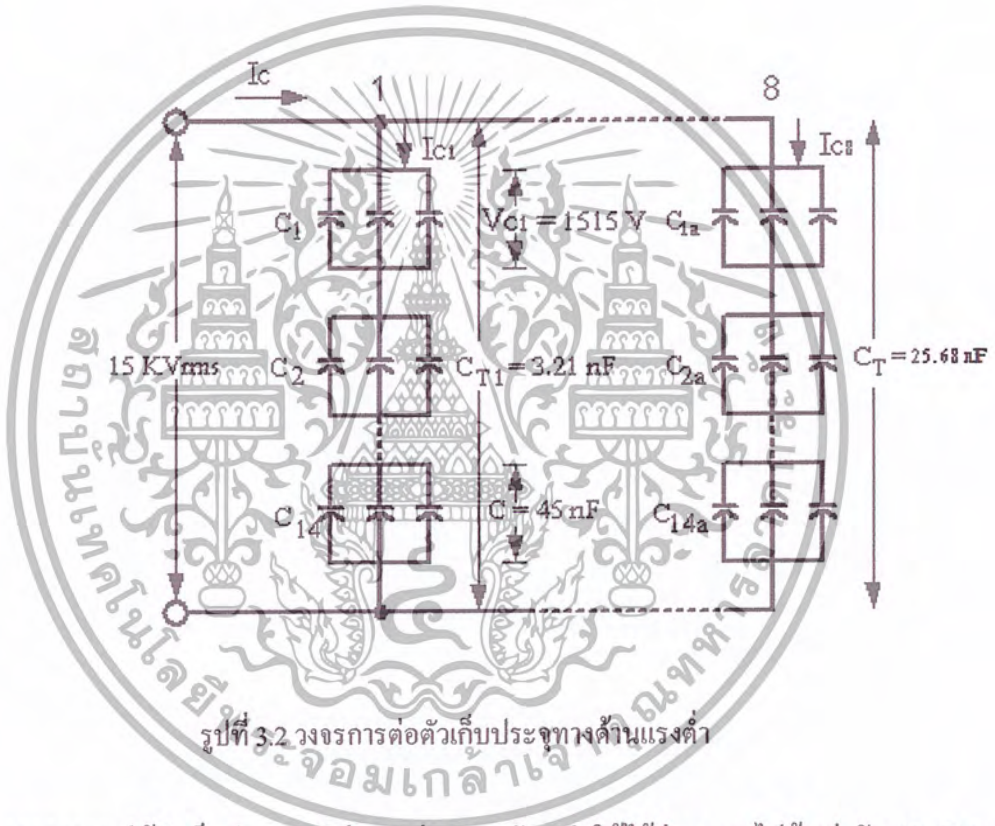
การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ สามารถหาได้จากการนำเอาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ได้คำนวณไว้จากข้อ 3.2 มาทำการหาค่าความจุของตัวเก็บประจุจากสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} C_{1\text{max}} &= 1/(2\pi fZ) \\ &= 1/(2\pi \times 50 \times 125 \times 10^3) \\ &= 25.465 \text{ nF} \end{aligned} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ค่าความจุ 15 nF ± 5% 1600 V โดยนำมาต่อขนานกันจำนวน 3 ตัวและนำมาอนุกรมกันจำนวน 14 ชุด เพื่อให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าที่ค่ายอดคลื่นประมาณ 22 kV_{peak} โดยทำการต่อเป็นแผงยาวแล้วบรรจุไว้ในท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว แล้วนำมาต่อขนานกันอีก 8 ชุด จะทำให้ได้ค่าความจุประมาณ 25.65 nF และจากหัวข้อที่ 3.2 เหตุที่ต้องนำเอาหม้อแปลงนี้ออนมาต่อขนานกัน 4 ตัว เพื่อจะทำให้ได้ค่าความจุทางด้านแรงดันต่ำมีค่าสูงเพื่อจะทำให้ค่าแรงดันที่จ่ายออกมีค่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ ตามสมการ

$$V_{out} = \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} * V_{in} \quad (3.3)$$



จากวงจรจะใช้ตัวเก็บประจุ 3 ตัวต่อขนานกัน ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 45 nF และสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 1515 V_{peak} หลังจากนั้นจะอนุกรมกัน 14 ชุด จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 3.21 nF และทนแรงดันไฟฟ้าได้ 22 V_{peak} ทำเหมือนกันอีก 8 ชุดแล้วนำมาขนานกันจะได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ออกแบบไว้ที่ 25.68 nF โดยจะใช้ตัวเก็บประจุทั้งหมด 336 ตัว และการคำนวณหากระแสไฟฟ้า I_c หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{V}{X_c} = j\omega CV = j2\pi fCV \\ &= 2\pi(50)(25.68 \times 10^{-9})(15 \times 10^3) \\ &= 0.12 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.4)$$

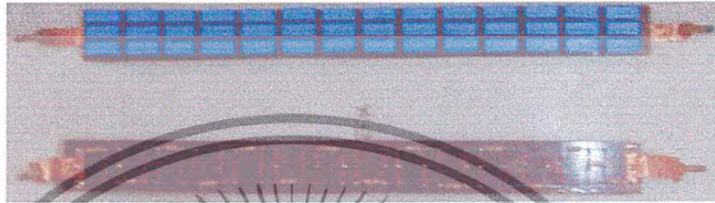
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการทนแรงดันไฟฟ้า

$$V_{Cl} = (15000 \times \sqrt{2}) / 14 \quad (3.5)$$

$$= 1515 \quad V_{peak}$$

ซึ่งตัวเก็บประจุสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 1600 V จึงไม่ทำให้ตัวเก็บประจุเสียหาย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเกินพิกัด



รูปที่ 3.3 ตัวเก็บประจุต้านแรงต่ำ

3.4 การออกแบบขดลวดทางต้านแรงสูง (L_p)

หม้อแปลงเตสลาที่จะสร้างขึ้นมีแกนเป็นอากาศจึงจำเป็นต้องมีโครงขดลวด ในโครงงานนี้จะใช้ท่อ PVC สำหรับพันขดลวดทางต้านแรงสูง เนื่องจากขดลวดดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ดูดความชื้น มีความแข็งแรงทนทาน ราคาไม่แพงและสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ในการเลือกขนาดท่อสามารถเลือกได้หลายขนาดตามความเหมาะสมในการออกแบบ ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเป็นตัวกำหนดความสูงในการพันขดลวด เพราะจะทำให้เกิดมิติในการ Coupling ที่ดีที่สุด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของท่อและความสูงที่เหมาะสมในการพันขดลวดแรงสูง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)	ความสูง/เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาวพื้นที่พันลวด
3	6.0:1	18.0
4	5.0:1	20.0
5	4.5:1	22.5
6	4.0:1	24.0
7	3.5:1	24.5
8	3.0:1	24.0
มากกว่า 8	3.0:1	24.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ 2.1

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.6)$$

สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงดันสูงได้ คือ

$$L_2 = 1/(4\pi^2 f^2 C_2) \quad (3.7)$$

ในการพันขดลวดทางด้านแรงสูง ค่าความเหนี่ยวนำมีโอกาสผิดพลาดได้เพื่อให้แน่ใจว่าจะได้ความถี่อยู่ในย่านที่กำหนดจึงเลือกความถี่ในการคำนวณขั้นแรกเป็น 200 kHz เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.6 จะเห็นว่า ถ้าพันขดลวดแล้วได้ค่าความเหนี่ยวนำมากเกินไป ความถี่จะต่ำลง ถ้าพันขดลวดแล้วได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าไม่น้อยเกินไปจะไม่ทำให้เกิดปัญหาแต่อย่างใด จะได้ความถี่สูงขึ้นตั้งนั้นจากสมการที่ 3.7 เมื่อแทนค่า $f=200$ kHz และผลรวมของโหนด $C_2 = 90$ pF จะได้

$$L_2 = 1/(4\pi^2 \times 200 \times 10^3 \times 90 \times 10^{-12}) = 7.04 \text{ mH} \quad (3.8)$$

ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูง L_2 นี้ จะเป็นกฎเกณฑ์ประการหนึ่งในการออกแบบขดลวดแรงสูง โดยจะต้องหาขนาดขดลวดที่ต้องนำมาพันขดลวดแรงสูง ซึ่งถูกกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส โดยคำนวณจากกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงเตสตา เมื่อใช้ทดสอบการวางไฟตามฉนวน ถูกด้วยฉนวน ซึ่งเปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านแรงดันสูง ดังนั้นการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดแรงสูงจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด สามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$I_{sc} = V_{rms}/Z = V_{rms}/(2\pi f L_2) \quad (3.9)$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} &= 400 \times 10^3 / (2\pi \times 200 \times 10^3 \times 7.04 \times 10^{-3}) \\ &= 45.214 \text{ A} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่เกิดเป็นลักษณะพัลส์ (pulse) ที่ไม่ต่อเนื่องตลอดความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่ 50 Hz สัญญาณพัลส์ที่เกิดจะมีความกว้างประมาณครึ่งคาบของความถี่ 200 kHz (2.5 μ s) หลังจากครึ่งคาบเวลาผ่านไปแล้ว กระแสที่ไหลผ่านขดลวดแรงสูงจะมีค่าเป็นศูนย์จนกว่าจะมีการสร้างแรงสูงขึ้นมาอีกครั้ง ถ้ามีพัลส์เกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด ความถี่ของพัลส์จะเป็น 100 Hz (10 ms) กระแสประสิทธิผลที่ผ่านขดลวดแรงสูงจึงสามารถหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_{\text{eff}} &= I_{\text{sc}} \times \sqrt{\text{ช่วงเวลาที่มีกระแส 1 คาบ} / \text{ช่วงเวลา 1 คาบ}} & (3.10) \\
 &= 45.214 \times \sqrt{2.5 \mu\text{s} / 10 \text{ms}} \\
 &= 714.896 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

จากความหนาแน่นกระแส (J) ที่ไหลผ่านขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและยอมรับได้ โดยทั่วไปทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 2.5 A/mm^2 พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงหาได้จาก

$$A_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} / J \quad (3.11)$$

เมื่อ $J =$ ค่าความหนาแน่นของกระแส, A/mm^2

$I_{\text{eff}} =$ กระแสประสิทธิผล, A

$A_{\text{eff}} =$ พื้นที่หน้าตัด, mm^2

แทนค่า

$$A_{\text{eff}} = 714.896 \text{ mA} / 2.5 \text{ A/mm}^2$$

$$= 0.286 \text{ mm}^2$$

$$= 2.86 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

หรือ

เมื่อคิดผลของสภาพนำเชิงผิว (Skin Effect) ที่มีความลึกของสภาพนำเชิงผิวซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิวได้จาก

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \mu \sigma}} \quad (3.12)$$

เมื่อ $\delta =$ ค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิว

$\sigma =$ สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ, Ω/cm

$\mu =$ Permittivity of Conductor

$f =$ ความถี่, Hz

ในกรณีของทองแดง $\sigma = 5.8 \times 10^9 \Omega/\text{cm}$ ฉะนั้น

$$\delta_{\text{cu}} = 6.62 / \sqrt{f} \quad \text{cm} \quad (3.13)$$

และความถี่ที่ต้องการ คือ 200 kHz จะได้ค่า

$$\delta_{\text{cu}} = 6.62 / \sqrt{200 \times 10^3}$$

$$= 0.015 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าใช้ลวดกลมในการพันขดลวดแรงสูง กระแสจะไหลผ่านเฉพาะที่ผิวรัศมี r_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถคำนวณหารัศมี r_1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}(\pi r_1^2 - \pi r_2^2) &= A_{\text{eff}} & (3.14) \\ [\pi r_1^2 - \pi (r_1 - \delta)^2] &= 2.86 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \\ r_1 &= 0.0378 \text{ cm}\end{aligned}$$

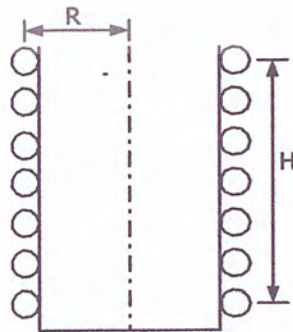
ค่า r_1 ที่คำนวณได้และคิดค่าปลอดภัยอีก 50% จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดประมาณ 0.1134 cm จากข้อมูลเส้นลวดทองแดงที่มีผลิตและจำหน่ายที่มีขนาดใกล้เคียง และสามารถนำมาพันขดลวดแรงสูงได้ค่าความเหนียวหน้าที่ใกล้เคียง คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1219 cm หรือเบอร์ 18 SWG คุณสมบัติของลวดตัวนำเบอร์ 18 SWG นี้มีความต้านทาน 1.318 $\Omega/100 \text{ m}$ ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.4 บริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลสภาพนำแข็งผิวของลวดทองแดง

การพันขดลวดแรงสูงจะขึ้นตามหลักการที่ 3.1 คือ ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจริงมีค่าเท่ากับ 6 นิ้ว ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราส่วนจะได้ความสูงที่ 24 นิ้ว โดยจะทำการพันขดลวดตลอดแนวโดยที่ไม่มีฉนวนชั้นกลางระหว่างรอบซึ่งค่าความเหนียวหน้าสามารถหาได้จากสมการ

$$D = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.5 มิติในการพันขดลวดแรงสูงที่ใช้ในสมการที่ 3.14 และ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ L = ค่าความเหนี่ยวนำ, μH
 R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางของลวด (นิ้ว)
 N = จำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูง
 H = ความสูงของระยะที่พันลวด (นิ้ว)

จากสมการที่ 3.11 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงได้

$$N = \sqrt{\frac{L(9R + 10H)}{R^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{7.04 \times 10^3 \times ((9 \times 3) + (10 \times 24))}{3^2}}$$

\therefore

$$N = 457 \text{ รอบ}$$



รูปที่ 3.6 ขดลวดแรงสูง L_2

ขดลวดแรงสูงจะมีค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray Capacitance) ซึ่งสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ 3.16

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94R\sqrt{\frac{R}{H}} \quad (3.16)$$

- เมื่อ C_s = ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์
 R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางของลวด (นิ้ว)
 H = ความสูงของระยะพันขดลวด (นิ้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ (L_1)

การสร้างขดลวดแรงดันต่ำจะนำเอาท่อทองแดงขนาด 1/4 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นทองแดง 0.028 นิ้ว โดยทำการพันแบบแบนระนาบกับพื้น โดยจะใช้ระยะห่างแต่ละรอบ 1/2 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดแรกของขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูงเท่ากับ 1.75 นิ้ว พันขดลวดจำนวน 10 รอบ จะได้ระยะ R เท่ากับ 7.25 นิ้ว และระยะ W เท่ากับ 4.5 นิ้ว ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้จาก

$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \quad (3.17)$$

เมื่อ L = ค่าความเหนี่ยวนำ, μH

W = ความกว้างของขดลวด, นิ้ว

R = ค่าเฉลี่ยของรัศมีของขดลวด, นิ้ว

N = จำนวนรอบ

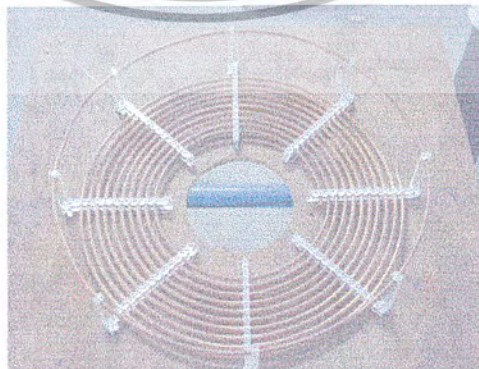
ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดแรงต่ำได้ดังนี้

$$L = \frac{(10 \times 7.25)^2}{(8 \times 7.25) + (11 \times 4.5)}$$

$$L = 48.895 \quad \mu\text{H}$$



รูปที่ 3.7 นิติการพันขดลวดแรงต่ำจากสมการที่ 3.17



รูปที่ 3.8 ขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกขนาดท่อทองแดงเราจะคำนึงถึงความหนาว่าใช้ได้หรือไม่โดยใช้สมการที่ 3.18 ในการคิดความหนา (δ) เป็นนิ้วจะได้

$$\delta_{cu} = 2.62/\sqrt{f} \quad (3.18)$$

แทนค่าความถี่ที่ 200 kHz จะได้

$$\begin{aligned} \delta_{cu} &= 2.62/\sqrt{(200 \times 10^3)} \\ &= 0.0058 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความหนาของทองแดงที่ใช้พื้นที่มีความหนา 0.028 นิ้ว จะเห็นว่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า นั้นแสดงว่าท่อทองแดงสามารถใช้ในการพันขดแรงต่ำได้

3.6 การออกแบบสร้างโรตารีแคป

สปาร์ตแคป QG ของหม้อแปลงเตสลาทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ ประการแรกกำหนดแรงดันอัดประจุทางด้านแรงต่ำ C_1 โดยการปรับระยะแคปให้ห่างมากขึ้นก็จะทำให้ได้แรงดันอัดประจุที่สูงขึ้น ประการที่สองทำหน้าที่ตัดอาร์คเมื่อเกิดสปาร์ตที่ QG เมื่อแรงดันอัดประจุ C_1 สูงพอและดิสชาร์จผ่านสปาร์ตแคป QG ส่งพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ C_1 ในรูปสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดด้านแรงดันต่ำ L_1 ในรูปของสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการออสมิลเลชันขึ้น เหตุที่ต้องมีการตัดอาร์คเพื่อทำให้การอัดประจุจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ C_1 ใหม่ แล้วดิสชาร์จช่วงใหม่ต่อไป เพราะฉะนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงหน้าที่ทั้งสองประการนี้ ในการออกแบบสปาร์ตแคปนั้นถ้าอาร์คจะดับได้เมื่อยี่ดออกจนมีระยะเป็น 2g เท่าของแคปนั้นคือ

$$l_u \geq 20g \quad (3.19)$$

เมื่อ l_u = ความยาวของการยี่ดลอาร์ค

g = ระยะห่างแคป

เมื่อช่วงเวลาในการดับอาร์คเป็น $1/4$ ของรูปสัญญาณอินพุท 50 Hz ($T/4$) โดยการออกแบบจะหาระยะ 2g ได้เมื่อ C_1 ทนแรงดันได้ 15 kV จะได้

$$\text{ระยะแคป} = 2g = 15 \text{ kV}/20 \text{ kV/cm}$$

$$\therefore g = 0.375 \text{ cm}$$

ความเร็วของอิเล็กโตรดหมุนตามเส้นรอบวง = $\pi dn/60 \text{ cm/s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าเวลาในการดับอาร์คเป็น $T/4$ ของสัญญาณอินพุทจะได้ระยะเท่ากับ $[(\pi d n / 60) \times (T/4)]$ จากข้อกำหนดเพื่อให้สามารถดับอาร์คได้สามารถหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดได้จาก

$$[(\pi d n / 60) \times (T/4)] \geq 20g \quad (3.20)$$

$$d \geq 20g \times [(60 \times 4) / \pi n T]$$

$$d \geq 20 \times 0.375 \times [(60 \times 4) / (1500\pi \times 0.044)]$$

$$d \geq 8.681 \text{ cm}$$

เลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดหมุนเท่ากับ 15 cm เพื่อให้การตัดลำอาร์คทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเลือกใช้มอเตอร์ 1 เฟส ความเร็วรอบ 1450 rms เป็นตัวหมุนจานอิเล็กโตรด เพราะฉะนั้นจะได้จำนวนตัวนำของอิเล็กโตรดจากสมการ

$$\begin{aligned} p &= 120f/n \\ &= (120 \times 50) / 1450 \\ &= 4 \text{ ตัวนำ} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ฉะนั้นต้องใช้อิเล็กโตรดประมาณ 4 ตัวนำในการอัดประจุแต่ละรอบ โดยในแต่ละตำแหน่งของการอัดประจุต้องใช้อิเล็กโตรด 2 ตัวนำในการส่งผ่านพลังงาน เพราะฉะนั้นจะต้องใช้อิเล็กโตรดทั้งสิ้น 8 ตัวนำ

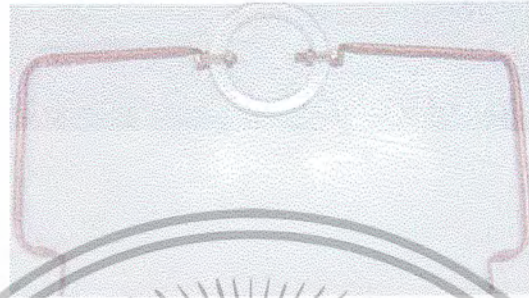
รูปที่ 3.9 โรตารีสปราร์คแกป

3.7 วงแหวนป้องกันและแกปป้องกันหม้อแปลงจ่ายกำลัง

เมื่อมีการต่อหม้อแปลงเพื่อจะใช้หม้อแปลงทดสอบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเบรคดาวผ่านอากาศในบางครั้งจะมีแรงดันส่วนหนึ่งจะพยายามเบรคดาวลงมาที่ขดลวดแรงต่ำ ซึ่งขดลวดดังกล่าวต่ออยู่กับหม้อแปลงแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งถ้าเกิดมีแรงดันสูงเข้าสู่หม้อแปลงจะทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หายได้ ดังนั้นจึงใช้วงแหวนดังกล่าวป้องกันขดลวดแรงดันต่ำเอาไว้ จะทำให้แรงดันสูงเบรคดาวนลงที่วงแหวนที่ค่ออยู่กับกราวด์ กระแสและแรงดันดังกล่าวก็จะไม่ทำให้หม้อแปลงเสียหายโดยจะใช้ท่อทองแดงขนาด 3/8 นิ้ว ทำการยึดไว้เหนือขดลวดแรงต่ำที่ตำแหน่งรอบสุดท้าย และถ้ามีบางส่วนเบรคดาวนลงมาที่ขดแรงต่ำจะใช้ตัวแกปป้องกันเป็นตัวให้เบรคดาวนผ่านลงกราวด์



รูปที่ 3.10 แกปป้องกันหม้อแปลงจ่ายกำลัง

3.8 ทอรอยด์

เมื่อต้องการใช้หม้อแปลงทดสอบแสดงปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เราต้องใช้ทอรอยด์ต่อเข้ากับด้านแรงสูงเพื่อให้เกิดสภาวะการจูน เพราะทอรอยด์เปรียบเสมือนตัวเก็บประจุค่าหนึ่ง ในโครงการนี้จะใช้ทอรอยด์ที่มีขนาดความจุ 20 pF โดยทำจากท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

รูปที่ 3.11 ลักษณะของทอรอยด์

3.9 ฐานรองรับอุปกรณ์

เมื่อทำการออกแบบและสร้างส่วนประกอบเสร็จแล้วจะนำมาประกอบเข้าด้วยกันบนฐานรองรับ โดยฐานรองรับจะทำการสร้างจากท่อ PVC นำมาประกอบกันเป็นสองชั้นเชื่อมต่อด้วยเสา 4 เสา และมีท่อยึดระหว่างเสา 6 ท่อ และใช้เป็นที่รองรับตัวเก็บประจุ ฐานรองรับชั้นล่างใช้รองรับหม้อแปลงแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังและสปาร์คแคป ชั้นที่สองใช้รองรับขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง โดยได้มีการติดตั้งล้อเลื่อน เพื่อให้เคลื่อนย้ายได้สะดวก



รูปที่ 3.12 ลักษณะของฐานรองรับ

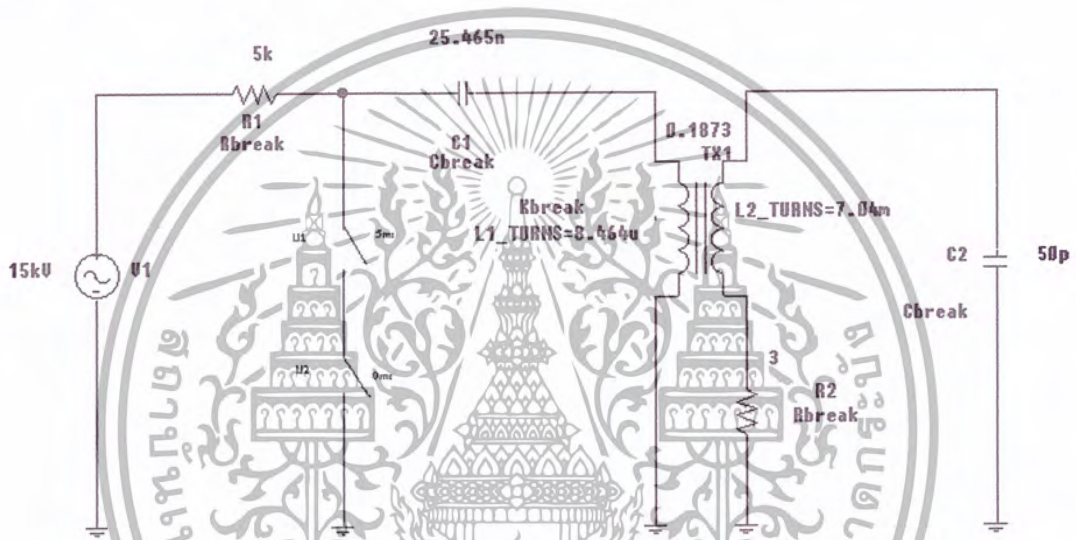
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล

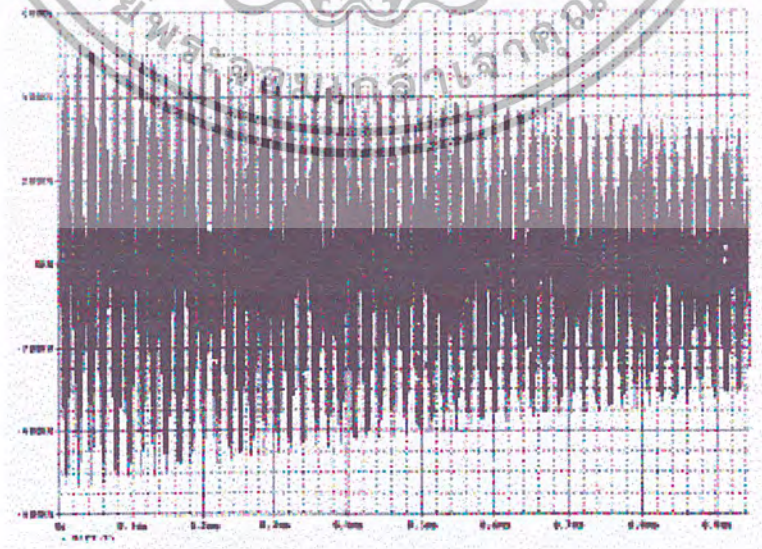
4.1 คำนำ

หลังจากทำการสร้างหม้อแปลงเตสลาเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำหม้อแปลงเตสลามาทำการทดสอบหาคุณลักษณะว่ามีค่าออกมาได้ตามค่าที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยใช้ลูกถ้วยจนวนเป็นโหลดทดสอบและมีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ทดสอบหาค่าแรงดันขาออกด้านแรงสูง และทดสอบหาค่าความถี่

4.2 Simulation Model ของหม้อแปลงเตสลา 400 kV 200 kHz



รูปที่ 4.1 Simulation Model ของวงจรสมมูลหม้อแปลงเตสลา



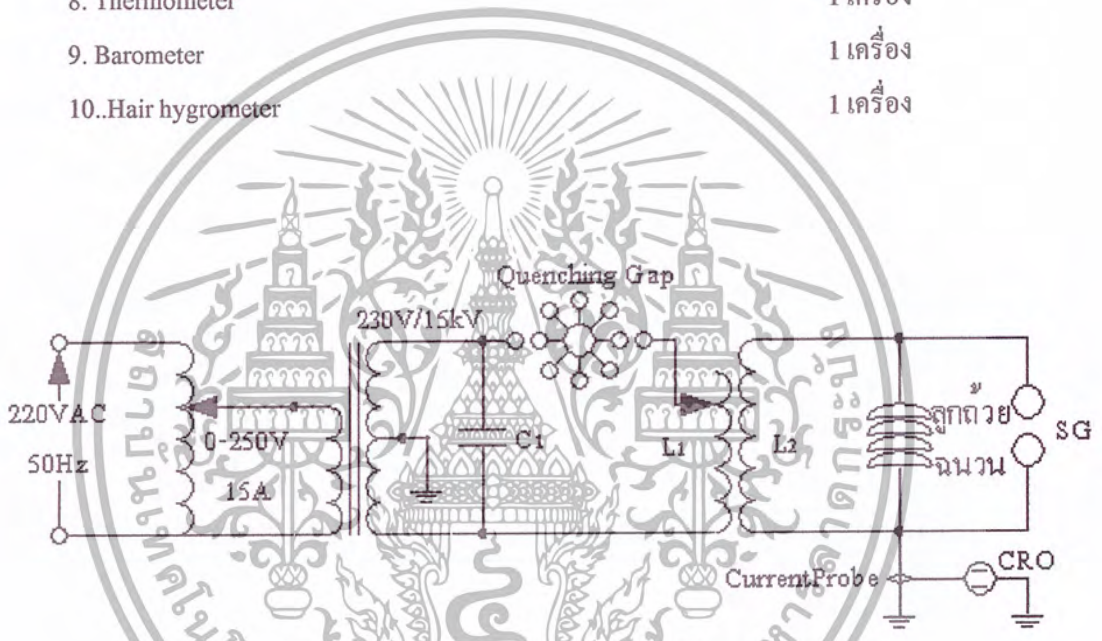
รูปที่ 4.2 ผลการ Simulation ของหม้อแปลงเตสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ทดสอบหาค่าลักษณะของหม้อแปลงเทสลา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-250 VAC 50 Hz 15A	1 เครื่อง
2. ชุดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (ฟิวส์และเบรกเกอร์)	1 ชุด
3. ชุดหม้อแปลงเทสลา	1 ชุด
4. ลูกถ้วยฉนวน	1 ชุด
5. Sphere Gap ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm	2 ลูก
6. ชุด Current Probe	1 ชุด
7. ออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง
8. Thermometer	1 เครื่อง
9. Barometer	1 เครื่อง
10. Hair hygrometer	1 เครื่อง



รูปที่ 4.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงเทสลา

4.3 การทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา

- ลำดับขั้นตอนการทดลอง (ระยะแก๊ปคงที่, ปรับรอบแรงต่ำ)

1. ต่อวงจรทดลองดังรูปที่ 4.3 ซึ่งต่ออุปกรณ์ทดสอบด้วย

2. ทำการปรับระยะสปาร์คแก๊ปไว้ที่ค่าที่ทำการออกแบบ 3.75 mm และจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำเริ่มต้น 3 รอบ ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ $L_1 = 4.95 \mu\text{H}$ และตั้งค่า Sphere gap ไว้ที่ 2 cm แล้วทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการสปาร์คที่ Sphere Gap ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกทางด้านแรงสูง ความดันห้อง อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ถ้าแรงดันที่จ่ายให้ชดเชยแรงค้ำยังไม่ถึงพิกัด จะทำการปรับระยะ Sphere Gap ให้ห่างออกไปเป็นขั้นๆ ขั้นละ 0.5 cm จนได้ค่าเบรคดาวน์ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เท่ากับ 230 V จึงทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่จำนวนของชดเชยแรงค้ำ 3 รอบ

4. ทำการทดลองตามข้อที่ 2. และ ข้อ 3. ใหม่ โดยปรับจำนวนรอบเพิ่มขึ้นทีละ 1 รอบแล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกทางด้านแรงสูงที่พิกัด 230 V ทำลักษณะนี้จนกระทั่งถึงจำนวนรอบสูงสุดของแรงค้ำที่ 10 รอบ

ตารางที่ 4.1 แรงดันขาออกด้านแรงสูงเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบแรงค้ำ (ที่ระยะแกป 0.375 mm)

จำนวนรอบ (รอบ)	แรงดันขาเข้า (V)	ความเหนี่ยวนำ (μ H)	แรงที่สภาวะ มาตรฐาน (kV)	แรงดันที่สภาวะ ห้อง (kV)
3	230	4.95	70	68.11
4	230	8.46	99	96.33
5	230	12.86	164	159.57
6	230	18.14	290	282.17
7	230	24.36	453	440.77
8	230	31.52	410	398.93
9	230	39.69	265	257.84
10	230	48.89	208	202.38

ขณะทำการทดลอง

อุณหภูมิ 38 °C

ความดัน 784 mm.Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ 42 %

เมื่อต้องการทราบค่าแรงดันขาออกของแรงสูงที่สภาวะห้องจากความสัมพันธ์

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d}$$

จากระยะแกป 3.75 mm ที่ ชดเชยแรงค้ำ 3 รอบ เบรคดาวน์ที่ระยะของ Sphere Gap 2.4 cm จะได้แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ 70 kV แต่ได้ทำการทดลองที่สภาวะความดัน 784 mm.Hg อุณหภูมิ 38 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 42% จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{0.386 \times 784}{273 + 38}$$

$$= 0.973$$

เมื่อค่าของ δ อยู่ระหว่าง 0.95-1.05 ค่า $k_d = \delta$

ฉะนั้นแรงดันทางค้ำแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบหาได้จาก

$$U_b = U_{bm} \times k_d$$

และที่แรงค้ำ 3 รอบจะได้

$$U_b = 70 \times 0.973$$

$$= 6.811 \text{ kV}$$

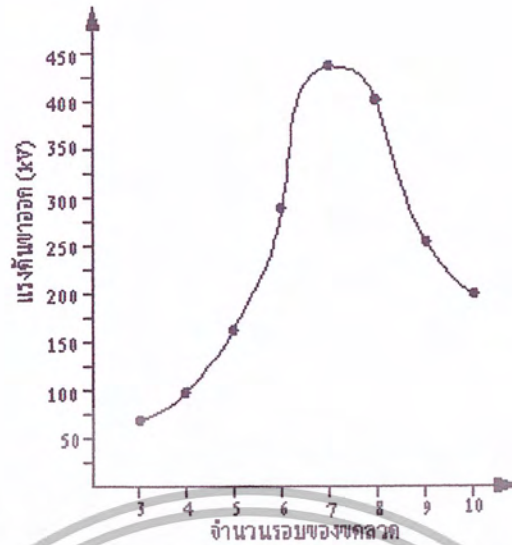
- การทดลองเมื่อมีการปรับระยะแกป (ที่จำนวนรอบแรงค้ำ 7 รอบ)

ตารางที่ 4.2 แรงดันขาออกทางค้ำแรงสูงที่ระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	แรงดันขาเข้า (V)	แรงดันที่สภาวะ มาตรฐาน (kV)	แรงดันที่สภาวะ ห้อง (kV)
2	230	315	306.5
2.5	230	339	329.85
3	230	387	376.55
3.5	230	432	420.33
3.75	230	453	442.13

หมายเหตุ: ใช้ sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 75 cm วัดค่าแรงดันเบรคดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับจำนวนรอบของขดลวดแรงดัน



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสสปาร์กแกน

ผลการทดลองหาค่าแรงดันสูงขาออกทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา ขึ้นอยู่กับเหตุกับผล 3 ประการ คือ

1). ขนาดความจุของโหลด C_2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดให้มีค่าความจุที่เพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.3

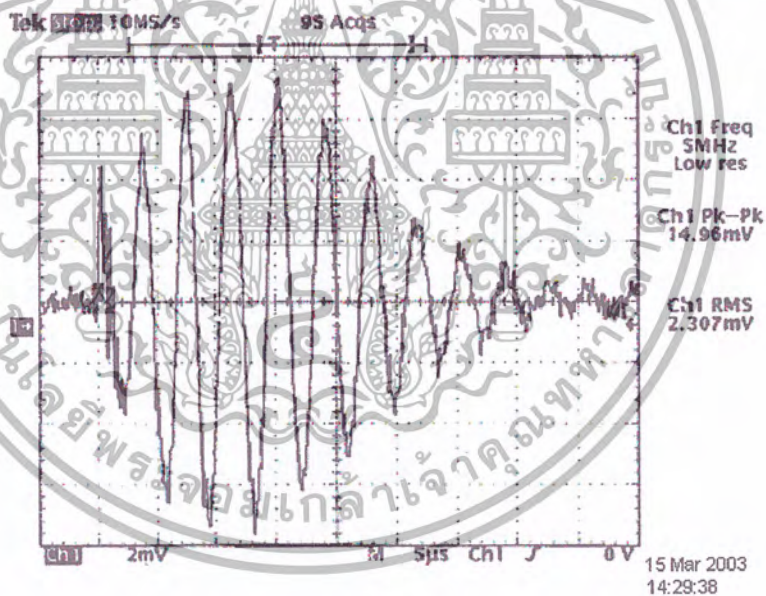
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แรงดันไฟฟ้าด้านจ่ายออกจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่สภาวะจูนที่พอดี แต่ถ้าเพิ่มจำนวนรอบขึ้นไปอีกแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

3) ระยะห่างระหว่างสปาร์กแก๊ปจะเห็นว่าที่ระยะแก๊ปค่าน้อย จะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าน้อยด้วย และเมื่อทำการเพิ่มระยะแก๊ปมากขึ้นแรงดันขาออกจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเก็บประจุของตัวเก็บประจุทำได้น้อยที่ระยะแก๊ปน้อย และตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นเมื่อระยะแก๊ปมีค่ามากขึ้น แต่จะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุดที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับระยะแก๊ปตามรูปที่ 4.5

4.4 วัดความถี่ของหม้อแปลงเทสลา

การวัดค่าความถี่นั้นทำได้โดยการใช้ Current Probe ต่อวัดรูปคลื่นด้านจ่ายออกของหม้อแปลง ซึ่งใช้ร่วมกับออสซิลโลสโคป ทำการวัดรูปคลื่นสัญญาณความถี่ขณะที่มีโหลดคลุกด้วยจนวนไฟฟ้าต่ออยู่ ค่าความจุไฟฟ้าทางค่านรองต่ำ $C_1 = 25.65 \text{ nF}$ และจำนวนขดลวดแรงต่ำเท่า 7 รอบ จากออสซิลโลแกรมสามารถหาค่าความถี่ได้ แล้วเปรียบเทียบกับผลการคำนวณสัมพันธ์



รูปที่ 4.6 คลื่นสัญญาณความถี่ขาออกด้านแรงสูง

จาก
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

ค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 200 kHz

ค่าจากการวัดจากการทดลอง 250 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นผลของค่าความถี่ที่วัดได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าหรือต่างจากการคำนวณไว้เล็กน้อย ทั้งนี้แสดงว่าค่าความจุไฟฟ้าของ C_2 ที่ใช้ในการทดสอบจริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในการออกแบบที่สภาวะจูน คือ

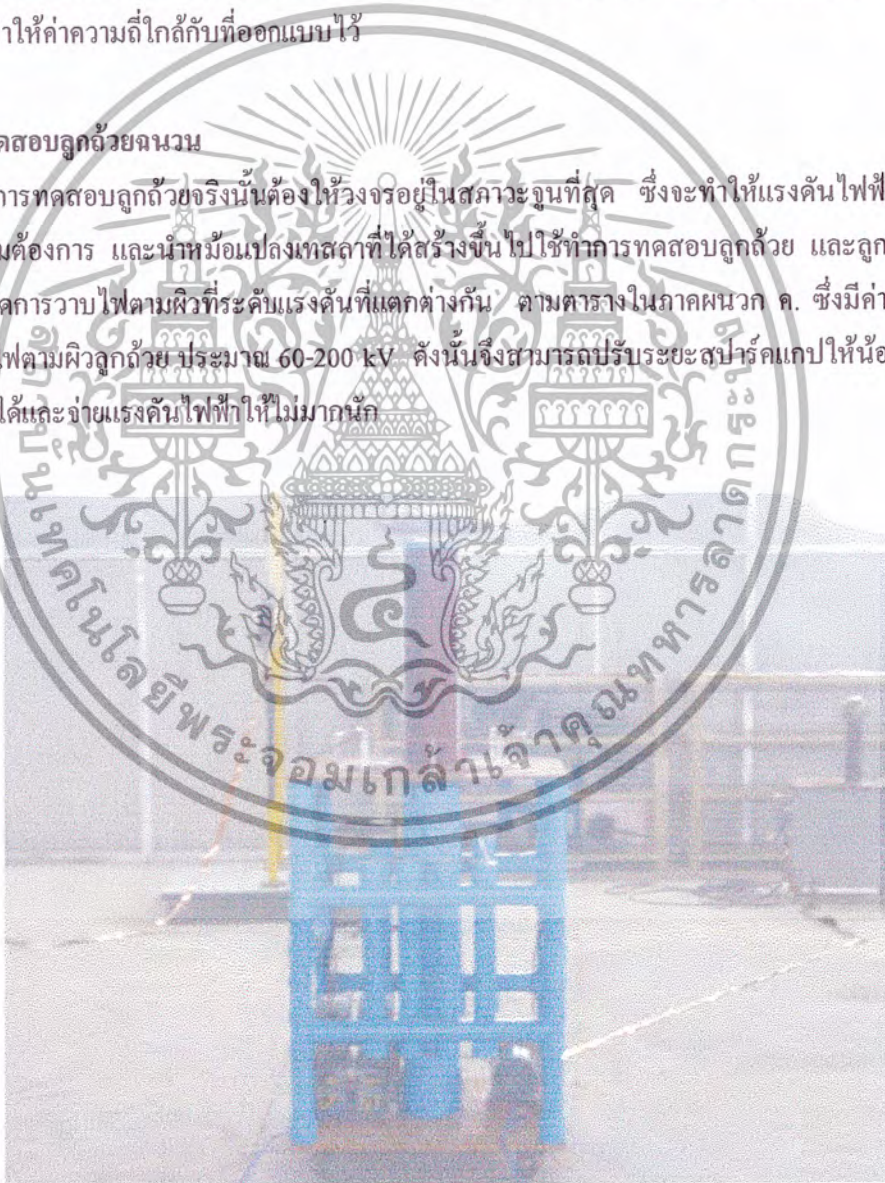
$$f = f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

มีค่าไม่ถึง 90 pF ซึ่งหมายความว่า ค่าความจุไฟฟ้าของโหลดด้านแรงสูงมีค่าน้อยกว่า หรือยังมีขนาดเล็กน้อยเอง และรูปคลื่นสัญญาณมีลักษณะที่ค่อนข้างจะเป็นสัญญาณไซน์ที่สมบูรณ์ และมีลักษณะใกล้เคียงกับทฤษฎี

ดังนั้น เราสามารถเปลี่ยนลูกถ้วยที่ทำการทดสอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นได้ เพื่อให้ค่าความถี่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวน

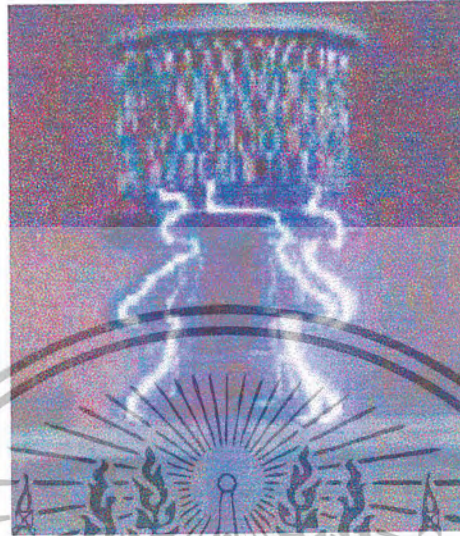
ในการทดสอบลูกถ้วยจริงนั้นต้องให้วงจรอยู่ในสภาวะจูนที่สุด ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกมา มีค่าสูงตามต้องการ และนำหม้อแปลงทดสอบที่ได้สร้างขึ้นไปใช้ทำการทดสอบลูกถ้วย และลูกถ้วยแต่ละชนิดจะเกิดการวาวไปตามผิวที่ระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ความตารางในภาคผนวก ค. ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่วาวไปตามผิวลูกถ้วย ประมาณ 60-200 kV ดังนั้นจึงสามารถปรับระยะสปาร์คแคปให้น้อยกว่าที่ออกแบบไว้ได้และจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ไม่มากนัก



รูปที่ 4.7 การใช้หม้อแปลงทดสอบทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน ชนิด AIL 57-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของลูกถ้วยฉนวนดีจะเห็นปรากฏการณ์การวับไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนดังรูปที่ 4.8 เป็นการทดสอบลูกถ้วยฉนวนก้านตรง ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนประมาณ 125 kV



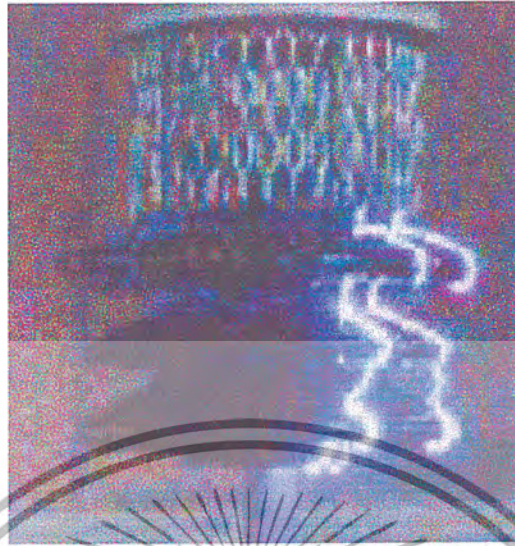
รูปที่ 4.8 การวับไฟตามผิวลูกถ้วยก้านตรงชนิด 56-3 ที่มีสภาพดี

และส่วนที่สองการทดสอบลูกถ้วยฉนวนบกพร่องจะไม่เกิดการวับไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน แต่จะเจาะทะลุผ่านดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.9 การทดสอบลูกถ้วยก้านตรง 56-2 ที่บกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การทดสอบการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยด้วยก้านตรง 56-2



รูปที่ 4.11 การทดสอบการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแท่ง AIL 57-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สรุปผลการทดลอง

จากการใช้หม้อแปลงเตสลาที่ได้สร้างขึ้นนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถนำมาใช้งานได้จริงโดยการนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนมาทดสอบกับชุดหม้อแปลงเตสลา นี้ ซึ่งสามารถทำการทดสอบหาความบกพร่องของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนได้ โดยการใช้แรงดันสูงและความถี่สูงทำให้เกิดการทะลุผ่านรูพรุนภายในหรือฟองอากาศ ทำให้เห็นบริเวณที่เกิดรอยร้าวหรือรูพรุนภายในเนื้อฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้สามารถแยกลูกถ้วยฉนวนที่ผิดปกติกับลูกถ้วยฉนวนที่สมบูรณ์ออกจากกันได้ โดยการสังเกตการเกิดปรากฏการณ์วาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่นำมาทำการทดสอบได้ด้วยตาเปล่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลของโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 คำนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงเตสลา 400 kV 200kHz จะมีรายละเอียดของค่าต่างๆที่กำหนดไว้ของหม้อแปลงเตสลาไว้ คือ พิกัดของแรงดันขาออก ความถี่ขาออก และลักษณะการใช้งานต้องคำนึงถึงโหลดความจุไฟฟ้าหรือลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน

ค่าที่กำหนดและ โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงเตสลา

- | | |
|--|-----------------|
| 1) พิกัดแรงดันด้านแรงสูง | 400 kV |
| 2) พิกัดความถี่ด้านแรงสูง | 200 kHz |
| 3) โหลดลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนที่ใช้ในระบบ | 12,24 และ 33 kV |
| 4) แหล่งจ่ายแรงดันด้านแรงต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้า AC | 50 Hz |

5.2 สรุปข้อมูลส่วนประกอบโครงสร้างที่ออกแบบไว้

รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ขดลวดด้านแรงสูง

การออกแบบและจัดสร้างดังนี้

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของขดลวดขนาด 6 นิ้ว พ้นลวดทองแดง 24 นิ้ว
- 2) ลวดทองแดงอบขนาด 2 ชั้น 200 °C เบอร์ 18 S.W.G. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด 0.1319 cm
- 3) ค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้ 6.98 mH

5.2.2 ขดลวดด้านแรงต่ำ

1) ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว มีส่วนที่เป็นเนื้อทองแดงหนา 0.03 นิ้ว พื้นเป็นลักษณะก้นหอย

2) จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ 10 รอบ

3) ระยะห่างระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ เมื่อคิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด 1/2 นิ้ว

5.2.3 โรตารีสปาร์คเกป

การออกแบบและจัดสร้างดังนี้

1) ใช้มอเตอร์สปริทเฟส 1/4 HP 220V 50 Hz 1440 rpm เป็นตัวหมุนงานอิเล็กทรอนิกส์ โตรค

2) งานอิเล็กทรอนิกส์ทำจากแผ่นอะครีลิกกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร

3) ใช้เนื้อทองเหลืองขนาด M12 จำนวน 8 ตัวเป็นอิเล็กทรอนิกส์ โตรคแล้วยึดติดกับงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 15 เซนติเมตร

4) ใช้เนื้อทองเหลืองขนาด M12 จำนวน 2 ตัวเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โตรคสำหรับการปรับระยะเกปโดย

ยึดอยู่กับที่ด้วยแผ่นอะครีลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ระยะห่างระหว่างแกปประมาณ 0.375 เซนติเมตร

5.2.4 พิกัดของอุปกรณ์อื่นๆทางด้านแรงต่ำ

- 1) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-250 VAC 50Hz 16A
- 2) หม้อแปลงน็ออนขนาด 230/15000 V 450VA
- 3) ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ (C1) ขนาด 25.65 nF 22400 V_{peak}
- 4) สวิตช์ตัดคอนอัท โนมัลติ(CB) ขนาด 10A และ 15 A 250VAC

5.3 สรุปผลการทดสอบ

หม้อแปลงเตสลาที่สร้างขึ้นสามารถใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนได้จริง โดยการทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่มีความสมบูรณ์ และสามารถให้แรงดันสูงสุดตามค่าโหนดที่สภาวะจูนพอดที่ 440 kV_{rms} และให้ความถี่ที่ 250 kHz โดยการป้อนแรงดันเข้าประมาณ 15 kV ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้คำนวณไว้ ค่าสูงสุดที่ระยการจูนที่พอดนั้นเป็นไปตามเงื่อนไข $L_1C_1 = L_2C_2$ โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดแรงสูงจะมีค่าคงที่ เมื่อ โหนด C_2 เปลี่ยนไปจะต้องเปลี่ยนค่า L_1C_1 ให้สอดคล้องสมการเรโซแนนซ์ วิธีที่สะดวกที่สุดคือ การเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงต่ำ โดยการแปรจำนวนรอบของขดลวดด้านแรงต่ำ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. Rotary Spark Gap ที่ออกแบบยังไม่สามารถใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานานได้ เนื่องจากวัสดุที่นำมาเป็นอิเล็กโตรดไม่สามารถทนความร้อนสูง ที่เกิดจากการสปาร์คอย่างต่อเนื่องได้มากนัก จึงไม่สามารถทดสอบต่อเนื่องได้นาน และการสปาร์คในแต่ละครั้งจะเกิดเสียงดังมาก หากมีการพัฒนาที่ควรคำนึงถึงจุดนี้ด้วย โดยเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรดและทำอุปกรณ์เก็บเสียง

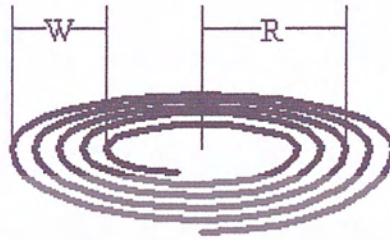
2. ทอรอยด์ที่สร้างขึ้นยังคลายความเครียดไม่สมบูรณ์นัก ควรเปลี่ยนเป็น Sphere ซึ่งสามารถคลายความเครียดสนามไฟฟ้าได้ดีกว่า

5.5 อุปสรรคในการทำโครงการ

เนื่องจากห้องทดลองวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้ทำการย้ายอุปกรณ์และเครื่องวัด ยังขาดความพร้อมและไม่อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ดังนั้นในการวัดรูปคลื่นสัญญาณความถี่ จึงขอความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าบางพลีและสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลฯคลองหก และขอยืมเครื่องวัดจากห้องปฏิบัติการ Power Electronic เพื่อจะนำมาใช้ในการวัดผลการทดลอง

ภาคผนวก ก
 สูตรการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ

ก.1 Archimedes Spiral, or Flat Pancake Coil



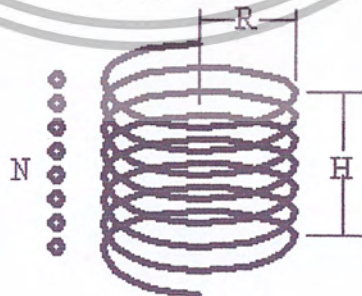
รูปที่ ก.1 ลักษณะการพันขดลวด Archimedes Spiral

$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

L = Inductance ของขดลวด (μH)
 N = จำนวนรอบ
 R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (inch)
 W = ความกว้างของขดลวด (inch)

(ก.1)

ก.2 Helical Coil



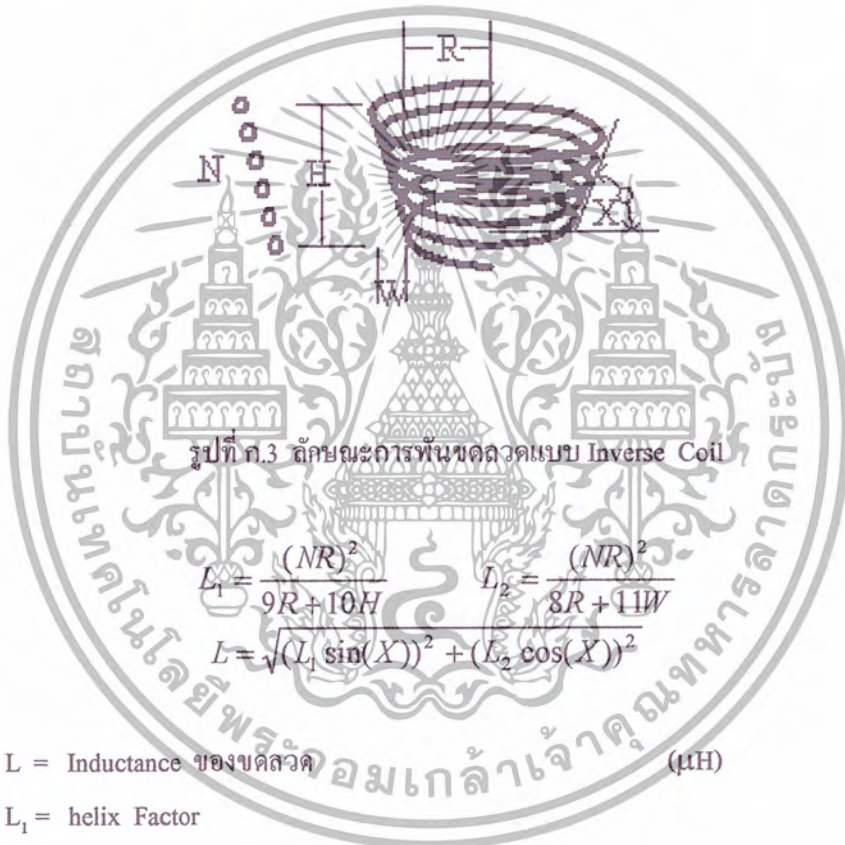
รูปที่ ก.2 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Helical Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (ก.2)$$

L = Inductance ของขดลวด	(μH)
N = จำนวนรอบ	
R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด	(inch)
H = ความสูงของขดลวด	(inch)

ก.3 Inverse Conical Coil



L = Inductance ของขดลวด	(μH)
L_1 = helix Factor	
L_2 = Spiral Factor	
N = จำนวนรอบ	
R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด	(inch)
W = ความกว้างของขดลวด	(inch)
H = ความสูงของขดลวด	(inch)
X = มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ	

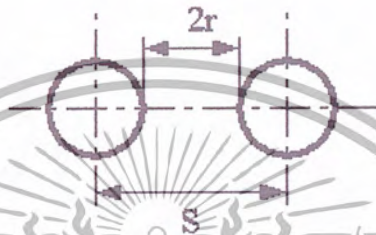
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขดลวด

ข.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ สามารถพิจารณาเป็นลวดตัวนำวางขนานกัน โดยที่เกรเดียนต์สูงสุดที่บริเวณผิวของลวดตัวนำ ในแนวที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของลวดตัวนำตาม สมการที่ ข.1และรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ลักษณะการวางตัวของลวดตัวนำที่หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

$$E_{\max} = \frac{V}{k_1 k_2} \text{ kV/cm} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ

$$k_1 = r \left[\frac{(S/2r) - 1}{\sqrt{(S/2r) + 1}} \right]$$

$$k_2 = \ln((S/2r) + \sqrt{(S/2r)^2 - 1})$$

V = คัดค่าไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวด, (kV/รอบ)/2

r = รัศมีของลวดตัวนำที่ใช้งาน, (cm)

S = 4r

โดยที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ป้อนเข้าขดลวดแรงต่ำ คือ 15 kV_{rms} หรือ 21,213.2 V_{peak} และเมื่อจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำมีค่าต่ำสุดสำหรับการใช้งานปกติ คือ 5 รอบ

ดังนั้นแรงดันต่อรอบเท่ากับ 21,213.2/5 = 4242.64 V/รอบ

$$V = 4242.64/2 = 2121.32\text{V/รอบ}$$

$$R = 0.635/2 = 0.3175 \text{ cm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = 4 * 0.3175 = 1.27 \text{ cm.}$$

$$k_1 = 0.1833$$

$$k_2 = 1.3169$$

$$E_{\max} = 2121 / (0.1833 * 1.3169) \\ = 8.8 \text{ kV/cm}$$

ซึ่งพบว่ามีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่ทำให้อากาศเกิดการเบรคดาวน์มาก คือ E_0 มีค่าประมาณ 25 kV/cm ซึ่งโดยปกติแล้วค่าแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดด้านแรงต่ำจะไม่เกิน 15 kV อยู่แล้ว จึงทำให้มั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ

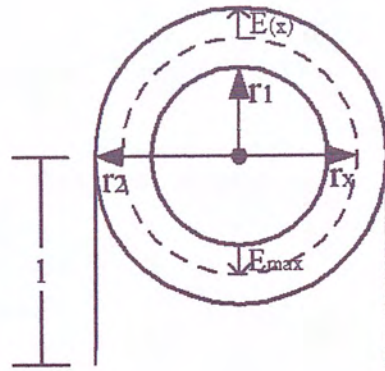
ข.2 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงทรงแปดเหลี่ยม มีจุดสำคัญในการออกแบบและสร้าง คือ ที่ขดลวดแรงสูงและแรงต่ำต้องสามารถทนแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงพอ ที่จะไม่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างแรงสูงและแรงต่ำ ดังรูปที่ ข.2 นั้นจะแสดงลักษณะการติดตั้งขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ ซึ่งวางห่างกัน โดยมีฉนวนเป็นอากาศโดยมีรายละเอียดของระยะฉนวนดังนี้ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ 4.45 cm และระยะเริ่มต้นเป็นแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง 8.255 cm



รูปที่ ข.2 ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการหาความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นของฉนวนสายเคเบิลทรงกระบอกแกนร่วม จากรูปที่ ข.3 ระหว่างตัวนำจะเปรียบเสมือนว่าเป็นตัวเก็บประจุโดยชั้นที่ฉนวนเป็นอากาศมีค่า Permittivity ของอากาศ ϵ_r ประมาณ 1 โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าในชั้นฉนวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข.2



รูปที่ ข.3 ลักษณะการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกแกนร่วม

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_2/r_1)} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อขดลวดแรงสูงมีค่าแรงดันไฟฟ้า V ประจุต่อหน่วยความยาวสามารถหาได้จาก

$$Q = CV \quad (\text{ข.3})$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีรัศมี r_x คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_{rx} &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} \\ E_{rx} &= \frac{QV}{2\pi\epsilon_x r_x} \end{aligned} \quad (\text{ข.4})$$

และจากสมการที่ ข.4 จะได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวน จะเกิดที่รัศมีที่น้อยที่สุด นั่นคือที่ $r_{(x)} = r_1$ โดยที่ r_1 เป็นรัศมีของขดลวดแรงสูง และมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำดังนี้

$$r_1 = 8.255 \quad \text{cm}$$

$$r_2 = 12.7 \quad \text{cm}$$

$$\epsilon_r = 1$$

ดังนั้น $C = 14.586\epsilon_0 \quad \text{F}$

เมื่อ ϵ_0 = ค่า Permittivity ของสุญญากาศ

V = แรงดันที่ขดลวดแรงสูง

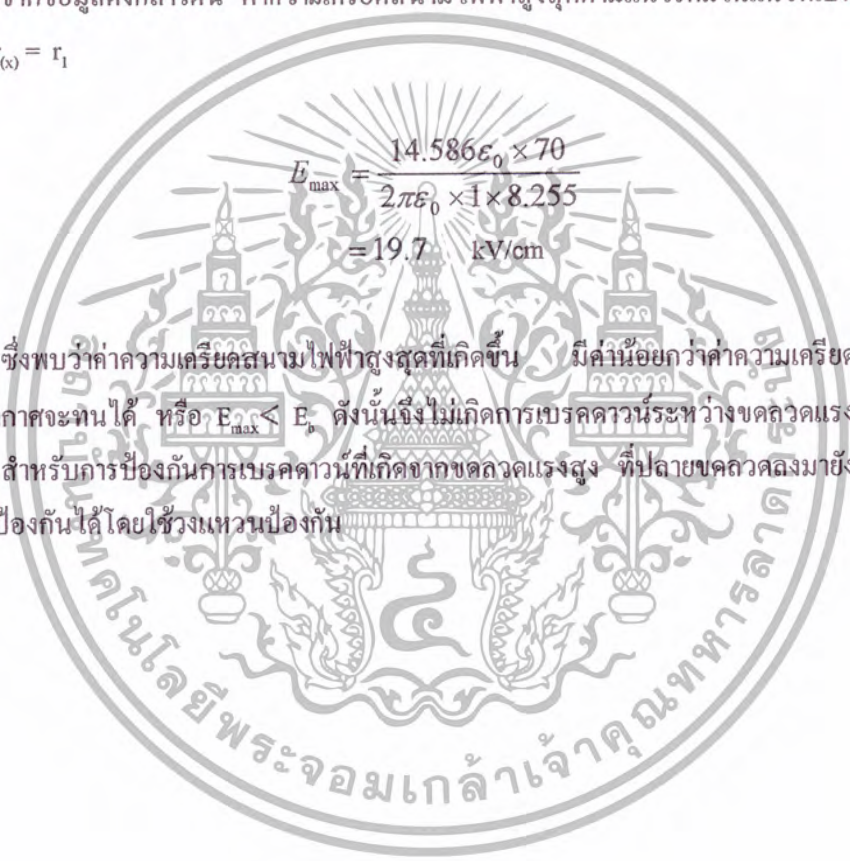
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องขดลวดแรงสูงและแรงต่ำมีความสูงไม่เท่ากัน และการหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะคิดในกรณีที่ขดลวดแรงสูงมีความสูงเท่ากับแรงต่ำ ซึ่งที่ขดลวดแรงต่ำมีความสูงประมาณ 1.00 cm ขดลวดแรงสูงมีความสูงทั้งหมด 62.23 cm และมีจำนวนรอบ 457 รอบ จำนวนรอบทั้งหมดรับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 kV โดยจะคิดความสูงของขดลวดแรงสูงประมาณ 5 cm จะมีจำนวนรอบประมาณ 40 รอบ และจะมีแรงดันประมาณ 35 kV ในขดลวดบริเวณนี้จะอยู่ใกล้กับขดลวดแรงต่ำมากที่สุดจึงมีการคัปปลิงมากที่สุดด้วย ทำให้แรงดันบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจึงคูณด้วยค่าคงที่ประมาณ 2 เนื่องจากที่สูงกว่า 5 cm จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนที่พิจารณาเพิ่มขึ้น อาจเกิดการเบรคดาวน์ในแนวรัศมีเฉียงลงมาทางด้านปลายของขดลวดแรงต่ำ เนื่องแรงดันตามความสูงของขดลวดแรงสูงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะได้ค่า V_0 เท่ากับ 70 kV

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตามแนวรัศมีในแนวที่เป็นอากาศเกิดขึ้นที่ระยะ $r_{(x)} = r_1$

$$E_{\max} = \frac{14.586\epsilon_0 \times 70}{2\pi\epsilon_0 \times 1 \times 8.255} = 19.7 \text{ kV/cm}$$

ซึ่งพบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนอากาศจะทนได้ หรือ $E_{\max} < E_0$ ดังนั้นจึงไม่เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ สำหรับการป้องกันการเบรคดาวน์ที่เกิดจากขดลวดแรงสูง ที่ปลายขดลวดลงมาขดลวดแรงต่ำสามารถป้องกันได้โดยใช้วงแหวนป้องกัน



ภาคผนวก ก.

วิธีการใช้หม้อแปลงทดสอบลูกถ้วย

ค.1 การรวบไฟตามผิว

การทดสอบการรวบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน อาจทดสอบโดยการทดสอบความถี่สูงทุกลูก เมื่อผ่านการรวบไฟตามข้อ ค.2 แล้วต้องไม่เกิดการเจาะผ่านหรือเกิดความเสียหาย

ค.2 การทดสอบความถี่สูง

ก) ป้อนแรงดันความถี่สูงแบบหนึ่งวง (Damp High Frequency Voltage) ให้เกิดการรวบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที ความถี่ของขบวนการคลื่นหนึ่งวงจะต้องมีค่าประมาณ 200 Hz
ข) ปลดปล่อยประจุความถี่สูงจากหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าแบบไร้อัตโนมัติ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ของแรงดันรวบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที ความถี่ซึ่งมีคลื่นซ้อน (Superimpose) อยู่เหนือแรงดันไฟฟ้าความถี่ตั้งต้องสูงกว่า 100 kHz

ค.3 การทดสอบความถี่ต่ำ

ป้อนแรงดันไฟฟ้าตามผิวหนึ่งวงให้เกิดการรวบไฟตามผิวหลายๆครั้งต่อเนื่องกัน เป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาทีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าต้องไปตามลักษณะที่ทำให้เกิดการรวบไฟตามผิว กระจายอย่างสม่ำเสมอ บนลูกถ้วยฉนวนที่ทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าต่างๆมีค่าแรงดันไฟฟ้ารวบไฟตามผิวไม่เท่ากัน ดังจะเห็นได้จากตาราง

ชนิดของลูกถ้วย	ค่าแรงดันรวบไฟตามผิวหนึ่ง 50 Hz,kV
1. ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อค AIF-5693	140
2. ลูกถ้วยก้านตรง แบบ 56-2	110
แบบ 56-3	125
3. ลูกถ้วยก้านตรง แบบ ALP11/175(สีขาว)	80
แบบ ALP11/365(สีขาว)	100
แบบ ALP11/520(สีขาว)	110
4. ลูกถ้วยแขน แบบ 52-1	60
แบบ 52-2	65
แบบ 52-3	80
แบบ 52-4	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 วิธีใช้หม้อแปลงทดสอบลูกถ้วย

1. เกี่ยวตะขอราวด์ที่ขั้วแรงสูงของหม้อแปลงจ่ายกำลังก่อนสัมผัสอุปกรณ์ใดๆ
2. ต่อวงจรไฟที่ป้อนหม้อแปลงจ่ายกำลังกับ Variac 0-250 V 16 A และต่อวงจรไฟป้อนมอเตอร์ของสปาร์คแกป จาก C.B ที่รับแรงดันไฟฟ้า 220 V
3. ต่อวงจรจากจุดต่อที่ทอรอยด์ด้านแรงสูงไปที่ลูกถ้วย และต่อกราวด์ที่ก้านลูกถ้วยจนวน
4. ต่อกราวด์ของหม้อแปลงทดสอบกับกราวด์ระบบ
5. ปรับตั้งระยะแกปของสปาร์คแกป (Quenching Gap) ให้มีระยะตามขนาดของลูกถ้วยที่ต้องการทดสอบ โดยตั้งจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ (L_1) ไว้ที่ตำแหน่งจูน คือ 7-8 รอบ
 - ลูกถ้วยขนาดเล็กและขนาดกลาง (เช่น ลูกถ้วยก้านตรง 56-2, 56-3) ตั้งระยะแกปข้างละ 2-3 mm
 - ลูกถ้วยขนาดใหญ่ (เช่น ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก 56-3) ตั้งระยะแกปข้างละ 3-3.75 mm
 และขณะทำการทดสอบให้สังเกตการเกิดการวาบไฟตามผิว ถ้ามีค่ากระแสไฟในการวาบไฟตามผิวที่สูงเกินไป ให้ทำการปรับระยะแกปให้แคบลงมา และถ้าเกิดการวาบไฟตามผิวน้อยเกินไปก็ให้ปรับระยะแกปให้ห่างเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะแกปค่าหนึ่งๆยังสามารถปรับค่าของแรงดันที่ทดสอบให้มากขึ้น (จะสังเกตเห็นการเกิดวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยมากขึ้น) หรือให้น้อยลง (จะสังเกตเห็นการเกิดการวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยน้อยลง) โดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าหม้อแปลงจ่ายกำลังที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของขดลวดปฐมภูมิ (ปรับค่าแรงดันที่ Variac) ได้
6. ยกตะขอราวด์ออกจากหม้อแปลงจ่ายกำลัง ไปแขวนไว้ที่ที่กำหนดไว้
7. ทำการดับสวิตช์ (On Switch) ให้กับมอเตอร์หมุนสปาร์คแกป (Quenching Gap) ก่อนที่จะทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงจ่ายกำลัง จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ตัวควบคุมแรงดัน (Variac) จนกระทั่งเกิดการวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยจนวนที่ทำการทดสอบ
8. เมื่อหยุดการทดสอบให้ปรับลดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ลดลงเป็นศูนย์ โดยการปรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Variac) แล้วปลดสวิตช์ (Off Switch)
9. เกี่ยวตะขอราวด์ที่ขั้วแรงสูงของหม้อแปลงจ่ายกำลัง และตามจุดต่างๆที่อาจจะมีประจุตกค้างอยู่ทุกครั้งก่อนที่จะเข้าไปสัมผัส หรือไปในบริเวณที่ทำการทดสอบ
10. เปลี่ยนขนาดหรือชนิดของลูกถ้วยจนวน ที่จะทำการทดสอบไปเป็นแบบอื่นแล้วทำการทดสอบตามขั้นเหมือนเดิม

หมายเหตุ: ข้อแนะนำและข้อควรระวังในขณะที่ทำการทดสอบ

- 1). ก่อนทำการทดสอบควรตรวจสอบจุดต่อต่างๆ ของวงจร และความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ทดสอบให้แน่ใจว่าต่อครบทุกจุดต่อภายในวงจร และไม่หลุดหลวมก่อนเริ่มทำการทดสอบทุกครั้ง (โดยเฉพาะส่วนที่เป็น Ground)
- 2). ก่อนเริ่มทำการทดสอบปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ให้ทำการป้อนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ชุดสปาร์คแกปก่อนแล้วจึงทำการป้อนไฟฟ้าให้กับชุดควบคุม และปรับค่าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3). ขณะทำการทดสอบผู้ที่ควบคุมและผู้ช่วยทดสอบที่เกี่ยวข้องทุกคน ไม่ควรอยู่ใกล้กับชุดที่ทำการทดสอบมากเกินไป เพราะอาจทำให้เกิดอันตรายได้ ควรอยู่ห่างออกมาจนพอสมควรและอยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัย

4). ในขณะที่ทำการทดสอบควรระวังค่าของกระแสไฟฟ้าเป็นพิเศษ โดยดูที่แอมป์มิเตอร์อย่าให้เกินค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ (เป็นค่าพิกัดที่ใช้ในปรับตั้งค่าของชุดอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน) เพราะอาจทำให้ชุดทดสอบชำรุดเสียหายได้

5). เมื่อเกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนและสังเกตเห็นการเกิดปรากฏการณ์ได้ชัดเจนแล้ว ไม่ควรเปิดไฟทิ้งไว้นานเกิน 3-5 วินาที เพราะอาจทำให้อุปกรณ์ภายในชุดทดสอบชำรุดเสียหายได้

6). หลังจากทำการทดสอบทุกครั้งจะต้องทำการ Discharge อุปกรณ์ที่มีประจุค้างเกิดขึ้น ทุกจุดก่อนที่จะเข้าสัมผัสหรือจับต้องอุปกรณ์นั้นๆ

ตำแหน่งที่จะทำการ Discharge ได้แก่ ขั้วต่อของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ(C_1) ขั้วต่อทางออกของหม้อแปลงเทสลา (L_2) ขั้วต่อทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงแหล่งจ่ายแรงดัน (Step up Transformer) เป็นต้น



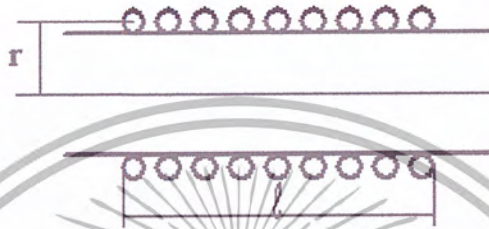
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

สมการคำนวณขดลวดแรงสูง

สมการจำนวนรอบของการพันขดลวดด้านแรงสูง

การคำนวณจำนวนรอบของขดลวดด้านแรงสูง เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการนั้น สามารถดูลักษณะการพันขดลวดได้จากรูปที่ ง



รูปที่ ง ลักษณะการพันของขดลวดทางด้านแรงสูง

ค่าความเหนี่ยวนำคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{0.39r^2n^2}{9r + 10l} \tag{ง.1}$$

- เมื่อ L = ค่าความเหนี่ยวนำ, uH
- r = รัศมีของลวดตัวนำ
- n = จำนวนรอบของขดลวด
- l = ความยาวของขดลวด, cm

จากสมการที่ ง.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยจากเซนติเมตรเป็นนิ้วจะได้ดังสมการที่ ง.2

$$L = \frac{1.00076r^2n^2}{9r + 10l} \tag{ง.2}$$

ดังนั้นสมการที่ ง.2 จะมีลักษณะคล้ายสมการที่ ง.1 ที่ได้มาจากสื่อสารสนเทศจึงสามารถแทนกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

TABLE1

SPHERE GAP WITH ONE SPHERE EARTH

Peak value of disruptive discharge voltage in kilovolt (50% value for impulse tests)

Valid for: Alternating voltage, full negative standard impulse and impulse with longer tails, direct voltage of either polarity.

Atmospheric reference condition : 20°C and 1013 milibars (760 mm.Hg at 0°C)

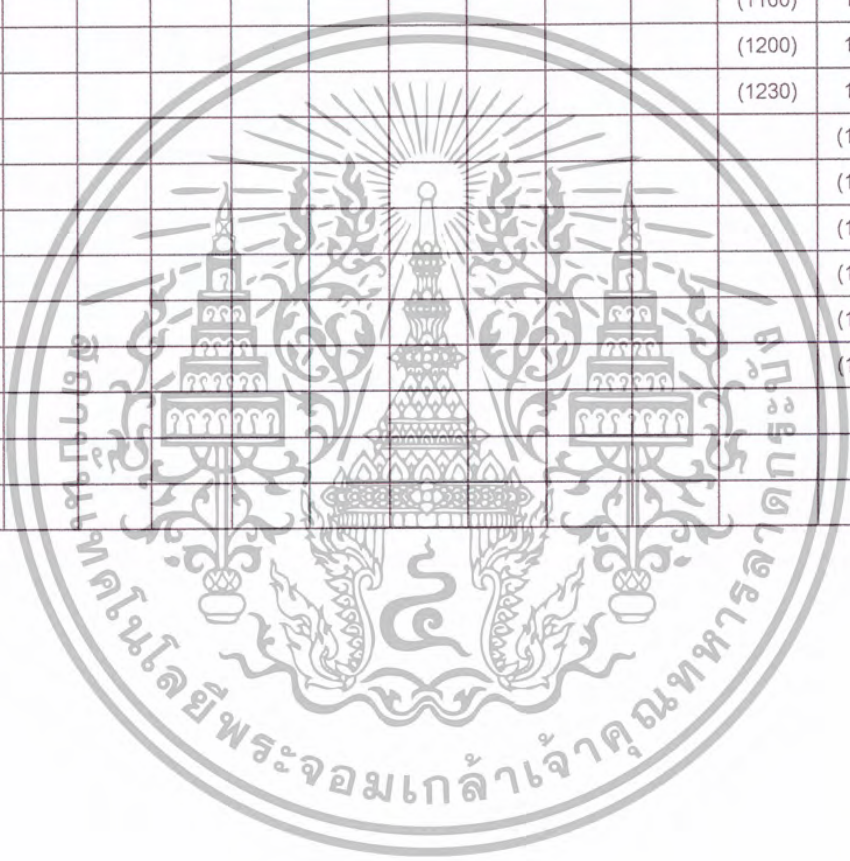
Sphere Gap Spacing cm.	Sphere diameter cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.0	16.0	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.00	39.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.20	(53.1)	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.40	(38.5)	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.50	(40.0)	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.60		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.80		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.00		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.20		63.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.40		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.60		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.80		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap Spacing cm	Sphere diameter cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
3.00		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.50		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.00		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112		
4.50			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5.00			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5.50				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6.00				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6.50				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7.00				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7.50				(155)	(168)	177	195	202	208	203	203	
8.00					(174)	(185)	206	214	215	213	215	
9.00					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	491	510	510	510
22								489	553	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705
30								(585)	665	710	745	750
32								(605)	695	745	790	795
34								(625)	725	780	835	840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap Spacing Cm	Sphere diameter cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
36								(640)	750	815	875	885
38								(665)	(775)	845	915	930
40								(670)	(800)	875	955	975
45									(850)	945	1050	1080
50									(895)	1010	1130	1180
55									(935)	(1060)	1210	1260
60									(970)	(1110)	1280	1341
65										(1160)	1340	1410
70										(1200)	1390	1480
75										(1230)	1440	1540
80											(1490)	1600
85											(1540)	1660
90											(1580)	1720
100											(1660)	1840
110											(1730)	(1940)
120											(1800)	(2020)
130												(2100)
140												(2180)
150												(2250)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE2
SPHERE GAP WITH ONE SPHERE EARTH

Peak value of disruptive discharge voltage in kilovolt (50% value for impulse tests)

Valid for: full positive standard impulses with longer tails

Atmospheric reference condition : 20°C and 1013 milibars (760 mm.Hg at 0°C)

Sphere Gap Spacing cm	Sphere diameter cm.												
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200	
0.05													
0.10													
0.15													
0.20													
0.25													
0.30	11.2	11.2											
0.40	14.4	14.3	14.2										
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8							
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9							
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0							
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0							
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9							
1.00	30.7	22.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7						
1.20	(35.1)	37.8	37.6	37.4	37.4	37.4	37.4						
1.40	(38.5)	43.3	43.2	42.9	42.9	42.9	42.9						
1.50		46.2	45.9	45.5	45.5	45.5	45.5						
1.60		49.0	48.6	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.80		54.5	54.0	53.5	53.5	53.5	53.5						
2.00		59.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0				
2.20		64.0	64.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5				
2.40		69.0	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0				
2.60		(73.0)	73.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5				
2.80		(77.0)	78.0	80.5	80.5	80.5	81.0	81.0	81.0				
3.00		(81.0)	82.0	85.5	85.5	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0			
3.50		(90.0)	(91.5)	97.5	98.0	98.5	99.0	99.0	99.0	99.0			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap Spacing cm	Sphere diameter cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
4.00		(97.5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4.50			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5.00			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5.50				(139)	145	147	151	151	151	151	151	
6.00				(148)	155	158	163	164	164	164	164	
6.50					(164)	168	175	177	177	177	177	
7.00					(173)	178	187	189	190	190	190	
7.50					(181)	187	199	202	203	203	203	
8.00					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9.00					(203)	(210)	233	239	240	241	241	
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(248)	290	311	310	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	435	438	438	438
19							(385)	461	482	486	486	486
20							(395)	480	505	510	510	510
22								510	545	555	560	560
24								540	585	600	610	610
26								570	620	645	655	660
28								(595)	660	685	700	705
30								(620)	695	725	745	750
32								(640)	725	760	790	795
34								(660)	755	795	835	840
36								(680)	785	830	880	885
38								(700)	(810)	865	925	935
40								(715)	(835)	900	965	980
45									(890)	980	1065	1090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap Spacing cm	Sphere diameter cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
50									(945)	1040	1150	1090
55									(985)	(1100)	1240	1290
60									(1020)	(1150)	1310	1380
65										(1200)	1380	1470
70										(1240)	1430	1550
75										(1280)	1480	1620
80											(1530)	1690
85											(1580)	1760
90											(1630)	1820
100											(1720)	1930
110											(1790)	(2030)
120											(1860)	(2120)
130												(2200)
140												(2280)
150												(2350)

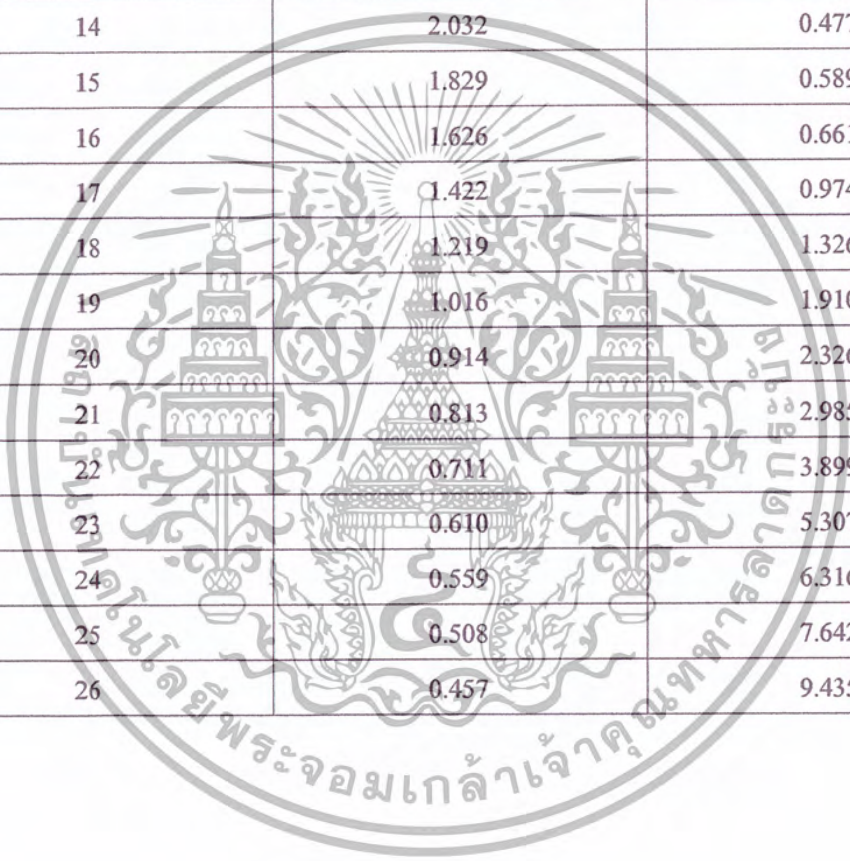


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

Data for Standard Round Copper Wires

S.W.G	Diameter(mm.)	Ohm/100
10	3.251	0.1866
11	2.946	0.2276
12	2.642	0.2826
13	2.337	0.3612
14	2.032	0.4776
15	1.829	0.5897
16	1.626	0.6611
17	1.422	0.9747
18	1.219	1.3267
19	1.016	1.9105
20	0.914	2.3267
21	0.813	2.9850
22	0.711	3.8990
23	0.610	5.3070
24	0.559	6.3160
25	0.508	7.6420
26	0.457	9.4350



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC

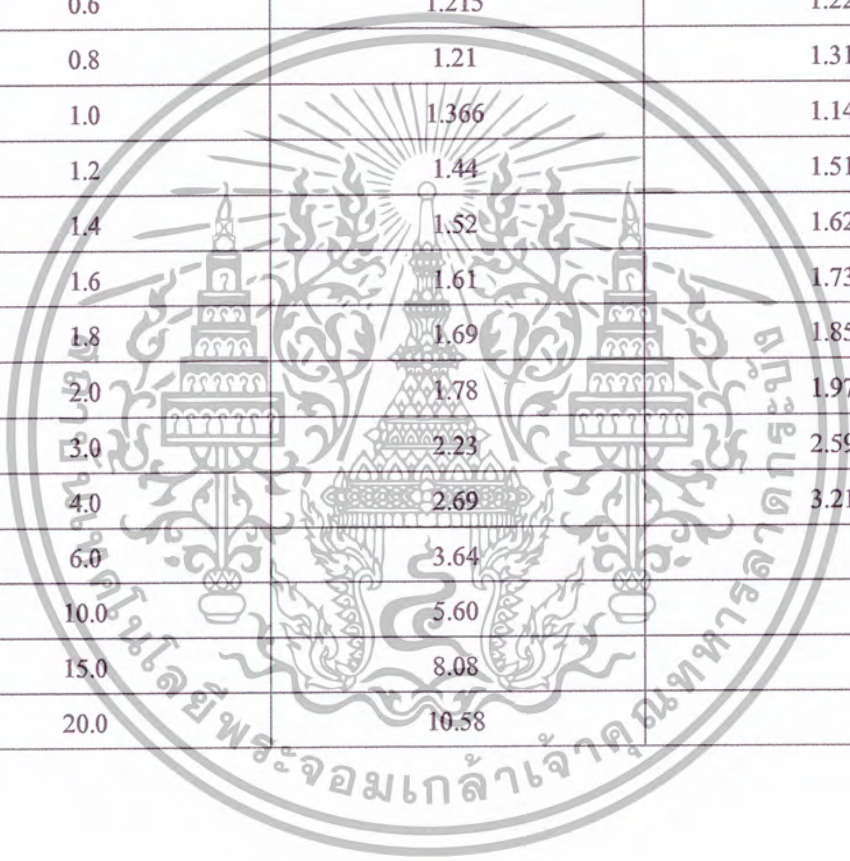
ITEM PROPERTIES	UNIT	TEST METHOD	VAVLUE
Specific gravity	-	A.S.T.M D792	1.43
Hardness	Rockwell R	A.S.T.M D785	120
Water absorption	Mg/cm ²	A.S.T.M D570	0.04 ~ 0.06
Tensile strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D638-60T	500 ~ 550
Elongation at breaking	%	A.S.T.M D638	100 ~ 170
Bending strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D790-59T	800 ~ 1000
Compressive strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D695	700
Modulus of elasticity	Kgf/cm ²	A.S.T.M D747	2.8 ~ 3.0*10 ⁴
Poisson's ratio	-	-	0.35 ~ 0.40
Impact strength	Kgf-cm/cm ²	A.S.T.M D256-56	5.0
Coefficint of linear expansion	°C ⁻¹	A.S.T.M D696	6 ~ 7*10 ⁵
Specific heat	Cal/g. °C	-	0.20 ~ 0.28
Thermal conductivity	Kcal/m.h. °C	-	0.12 ~ 0.14
Softening temperature	°C	A.S.T.M D648-56	75 ~ 82
Flame resistance	-	A.S.T.M D635-56T	Self-extinguishing
Volume resistivity	Ωcm	A.S.T.M D257-54T	3 ~ 5*10 ¹⁵
Dielectric strength	kV/mm	-	More than 40
Dielectric power factor	-	A.S.T.M D150-54T	0.02
Dielectric constant	-	A.S.T.M D150-54T	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน

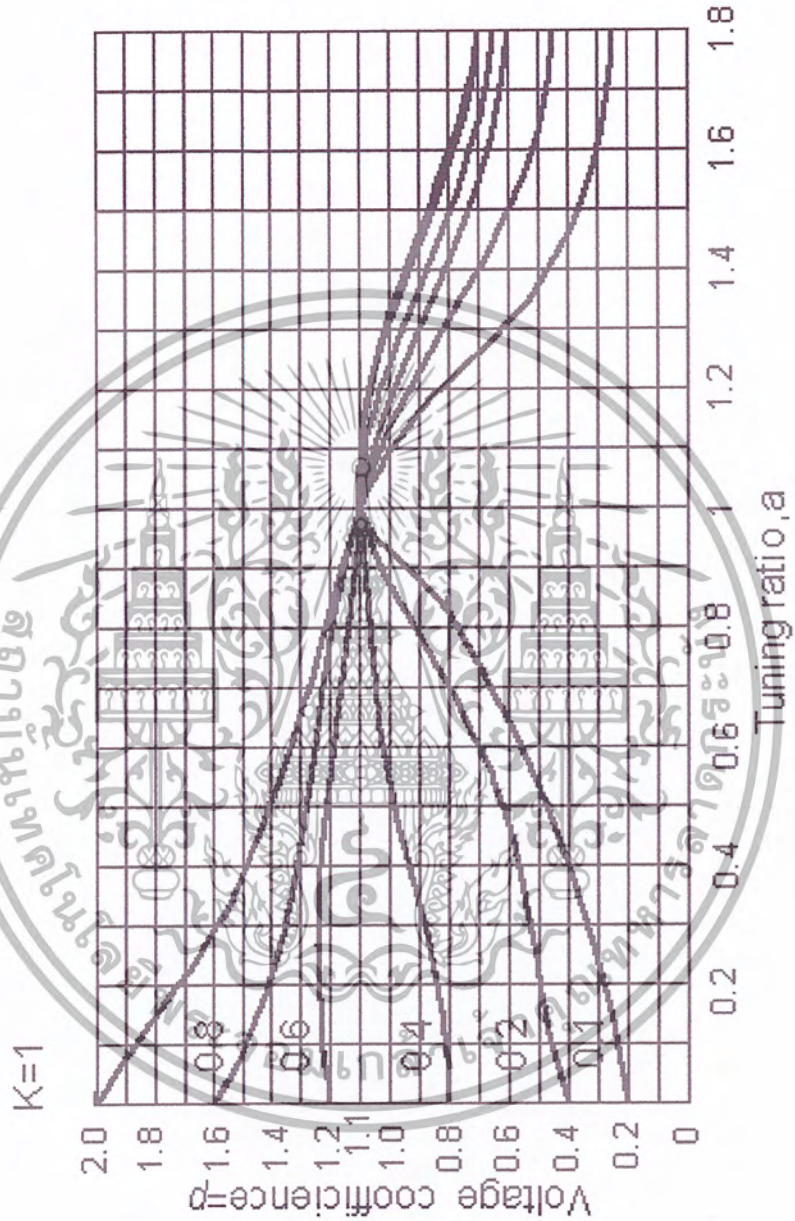
X/R	f (not earthed)	f_0 by measurement
0.1	1.03	1.03
0.2	1.06	1.06
0.4	1.14	1.14
0.6	1.215	1.22
0.8	1.21	1.31
1.0	1.366	1.14
1.2	1.44	1.51
1.4	1.52	1.62
1.6	1.61	1.73
1.8	1.69	1.85
2.0	1.78	1.97
3.0	2.23	2.59
4.0	2.69	3.21
6.0	3.64	
10.0	5.60	
15.0	8.08	
20.0	10.58	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

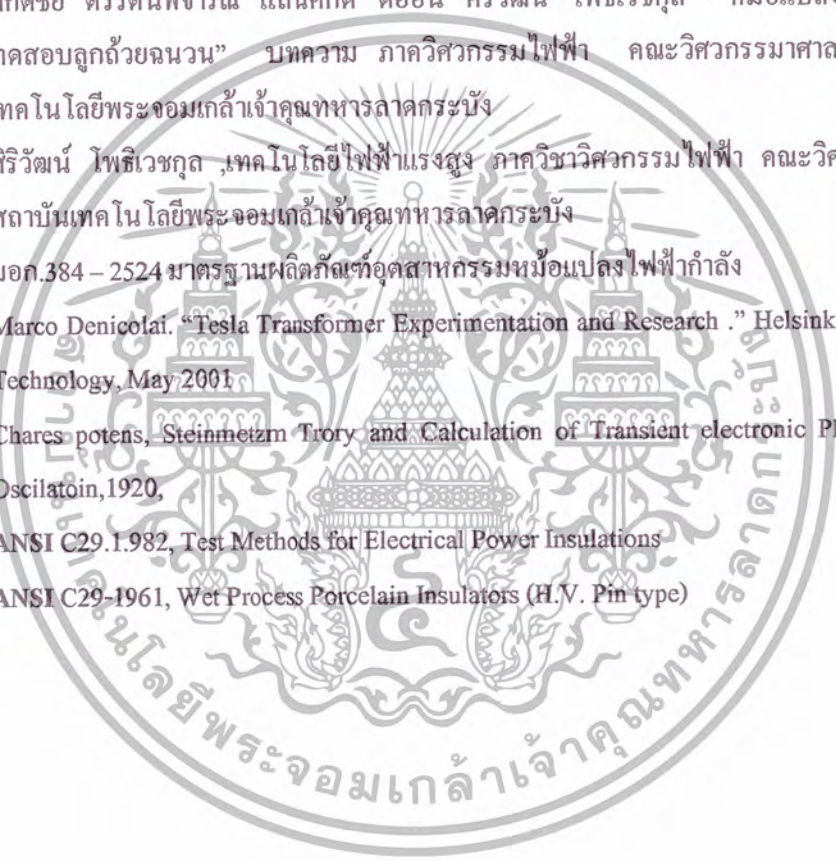
PARAMETER OF TESLA TRANSFORMER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ดร.สำรวย สงข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [2] ดร.สำรวย สงข์สะอาด อุปรกรณ์ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, IEEE Thailand Section Seminar on High Voltage Power Equipment and Techniques, 2524
- [3] เฉลิมชัย พิริยะศิลป์ รัชฎาธิ์ โสมเกษตริรินทร์ และพิเชษฐ์ ช่วยหล้า “การพัฒนาหม้อแปลง เทสลา” ปรินญาณิพนธ์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2539
- [4] ศักดิ์ชัย ตริรัตน์พิจารณ์ แสนศักดิ์ ตี๋อ่อน ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล “หม้อแปลงเทสลาสำหรับ ทดสอบลูกถ้วยฉนวน” บทความ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล ,เทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูง ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] มอก.384 – 2524 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
- [7] Marco Denicolai. “Tesla Transformer Experimentation and Research .” Helsinki University of Technology, May 2001.
- [8] Chares potens, Steinmetzm Troty and Calculation of Transient electronic Phenomena and Oscilatoin,1920,
- [9] ANSI C29.1.982, Test Methods for Electrical Power Insulations
- [10] ANSI C29-1961, Wet Process Porcelain Insulators (H.V. Pin type)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้